

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

# **Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos Mediante Thermoflex**

Autor: Eloy de los Ángeles León

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Industrial

# **Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos Mediante Thermoflex**

Autor:

Eloy de los Ángeles León

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado: Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos  
Mediante Thermoflex

Autor: Eloy de los Ángeles León

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mis familiares y amigos*

*A mis docentes*





# Agradecimientos

---

La realización de este trabajo fin de grado, que se redactó inicialmente como PFC, no habría sido posible sin la ayuda de mi tutor, el profesor Francisco Javier Pino Lucena. Así como del jefe del área de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla, el CAT. José Julio Guerra Macho, el cual inicialmente aceptó el proyecto original.

Quisiera mencionar también al profesor Luís Pérez-Lombard Martín de Oliva, quien, pese a no tener relación con el mismo, compartió conmigo durante su realización en el departamento alguna que otra larga tarde de trabajo los viernes.

Extiendo también los agradecimientos a otros grandes docentes que tuve la suerte de encontrar a lo largo de mi vida académica, cuya profesionalidad en su trabajo siempre significó una motivación extra. Los profesores Enrique Drake Moyano, Federico París Carballo, Daniel Limón Marruedo, y muy especialmente el Dr. Antonio Quijada Jimeno, cuyas clases formarán siempre parte de mi recuerdo como alumno.

Agradecer a mis compañeros José María Gámez Mancera y Eduardo Miguel García Juárez, los cuales siempre prestaron su ayuda desinteresadamente. Al igual que a Pablo Cádiz Monteagudo. También a Javier García Ramos, Pablo Ávila Serrano, y a otros tantos que junto a los primeros hicieron que esta etapa mereciera la pena.

Por último, a mi familia, que, a pesar de las dificultades, siempre me apoyó, incluso creyendo más en mí que yo mismo. Con especial cariño a mi abuelo Manuel León Cruz (D.E.P.), al cual le debo muchísimo de lo que hoy soy.

*Eloy de los Ángeles León*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

Este proyecto contempla la modelización en el software Thermoflex de una central de energía termosolar de captadores cilindro-parabólicos a partir de un esquema de la distribución de la misma y una serie de valores básicos de ciertos parámetros. Posteriormente, se utiliza dicho modelo para realizar la simulación del funcionamiento de dicha planta a lo largo de un año tipo, utilizando para ello el complemento ELINK del software que permite la interacción del modelo con un documento Excel que suministra las condiciones de dicho año tipo.



# Introducción

---

Inicialmente, este proyecto iba a abordar un análisis de eficiencia de los dos modos de almacenamiento más comunes en centrales solares de forma genérica, a saber, almacenamiento en dos tanques (frío y caliente), y almacenamiento en un solo tanque con una interfaz termoclina, en el modo dinámico de Thermoflex. No obstante, y puesto que ya existían algunos estudios en torno a este respecto, se nos propuso cambiar de perspectiva y realizar el modelado dinámico de una central real que va a ser construida en China, para el cual, la empresa encargada del desarrollo del proyecto precisaba soporte.

En primer lugar se realiza una breve introducción de la tecnología termosolar en el capítulo 0.

En el capítulo 1 se presenta el proyecto de la central solar, así como los datos geográficos y climáticos suministrados por la empresa para llevar a cabo el modelado.

El capítulo 2 describe el software usado en este proyecto, y da una visión global de sus dos modos principales y su complemento para simulaciones en Excel.

Se realiza un modelo inicial en el punto de diseño, con el fin de comprobar los datos suministrados por la empresa y como base para nuestro proyecto en el capítulo 3.

Posteriormente, en el capítulo 4, abordamos el modelado a carga parcial de la planta en el modo "Off-design" en 4 situaciones adicionales, como punto de partida previo para el establecimiento de las correlaciones necesarias para llevar a cabo la simulación dinámica horaria. Dichas correlaciones se exponen al final del capítulo.

El proceso de simulación horaria a partir de los datos anteriores y mediante el uso del complemento ELINK, se detalla en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se exponen los resultados y conclusiones de cara a la construcción de la planta.

Por último, se presentan 2 anexos. El Anexo A presenta el análisis del movimiento solar sobre la planta con su correspondiente programación en Matlab. El anexo B por su parte, recoge algunas explicaciones adicionales relativas a la toma de decisiones en la realización del proyecto.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Introducción</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>0 Introducción a la Tecnología Termosolar</b>	<b>1</b>
<b>1 Proyecto CGN-D 55MW Solar Thermal Generation</b>	<b>5</b>
1.1 <i>Generalidades del proyecto</i>	5
1.2 <i>Localización, Condiciones ambientales medias y Año meteorológico tipo</i>	7
1.3 <i>Sistemas y Equipos</i>	8
1.4 <i>Modificaciones en el proceso de modelado</i>	10
<b>2 Software Thermoflex 25</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Análisis Termodinámico y Modo Ingeniería</i>	11
2.2 <i>Modo Análisis Off-design</i>	14
2.3 <i>Complemento ELINK</i>	15
<b>3 Modelado en el Punto de Diseño</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Modelo del ciclo de vapor</i>	17
3.2 <i>Modelo del ciclo de HTF</i>	64
3.3 <i>Corrientes (Streams)</i>	84
<b>4 Modelado de la Planta a Carga Parcial</b>	<b>89</b>
4.1 <i>Situaciones de carga parcial</i>	89
4.1.1 <i>Funcionamiento al 75% de carga</i>	89
4.1.2 <i>Funcionamiento al 50% de carga</i>	94
4.1.3 <i>Funcionamiento al 25% carga</i>	98
4.1.4 <i>Funcionamiento al mínimo técnico (<math>\approx 20\%</math> carga)</i>	102
4.2 <i>Correlaciones</i>	106
<b>5 Simulación Horaria (Complemento ELINK)</b>	<b>109</b>
5.1 <i>Definición de variables de entrada</i>	111
5.2 <i>Análisis de las simulaciones</i>	113
<b>6 Valoración de Resultados y Conclusiones</b>	<b>117</b>
<b>Anexo A: Movimiento solar en Matlab (simulación)</b>	<b>121</b>
<b>Anexo B: Justificaciones en torno a la toma de decisiones</b>	<b>125</b>
<b>Referencias</b>	<b>127</b>
<b>Glosario</b>	<b>129</b>





# Índice de Tablas

---

Tabla 3.1: Parámetros (ST Group)	19
Tabla 3.2: Variables ST Group 1	21
Tabla 3.3: Variables ST Group 2	23
Tabla 3.4: Variables ST Group 3	25
Tabla 3.5: Variables ST Group 4	27
Tabla 3.6: Variables ST Group 5	29
Tabla 3.7: Variables ST Group 6	31
Tabla 3.8: Variables ST Group 7	34
Tabla 3.9: Parámetros de Precalentadores	36
Tabla 3.10: Parámetros Desaireador	42
Tabla 3.11: Variables Desaireador	43
Tabla 3.12: Parámetros Condensador	44
Tabla 3.13: Parámetros Separador de mezcla	46
Tabla 3.14: Parámetros Intercambiador de calor vapor/vapor	47
Tabla 3.15: Variables Intercambiador de calor vapor/vapor	48
Tabla 3.16: Parámetros Bombas	49
Tabla 3.17: Variables Bomba 14	51
Tabla 3.18: Variables Bomba 17	53
Tabla 3.19: Parámetros Aportes de caudal de agua	54
Tabla 3.20: Parámetros Sumideros de caudal	56
Tabla 3.21: Parámetros Agua de maquillaje	57
Tabla 3.22: Parámetros Válvulas	58
Tabla 3.23: Parámetros Divisores y Mezcladores de corrientes	60
Tabla 3.24: Parámetros Tuberías	61
Tabla 3.25: Variables Campo solar	66
Tabla 3.26: Variables Campo solar (sistema de almacenamiento)	69
Tabla 3.27: Variables Campo solar (colectores)	70
Tabla 3.28: Parámetros Intercambiadores de calor vapor/HTF	72
Tabla 3.29: Variables Intercambiador de calor vapor/HTF 67	74
Tabla 3.30: Variables Intercambiador de calor HTF/vapor 68	76
Tabla 3.31: Parámetros Bomba HTF	77
Tabla 3.32: Variables Bomba HTF	79
Tabla 3.33: Parámetros Elemento HTF Specification	80
Tabla 3.34: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF	84

Tabla 4.1: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 75% de carga	91
Tabla 4.2: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 50% de carga	95
Tabla 4.3: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 25% de carga	99
Tabla 4.4: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF en torno al 20% de carga	103
Tabla 4.5: Comparativa de los distintos estados de carga	106
Tabla 4.6: Puntos de ajuste $I_d - \dot{m}_b$	107
Tabla 4.7 Puntos de ajuste $I_d - P_{\min}$	108
Tabla 6.1: Macro resultados de la simulación (1)	117
Tabla 6.2: Macro resultados de la simulación (2)	118
Tabla 6.3: Macro resultados de la simulación (3)	119
Tabla 6.4: Macro resultados de la simulación (4)	120

# Índice de Figuras

---

Figura 0.1: Central solar de torre	1
Figura 0.2: Central solar de discos Stirling	2
Figura 0.3: Central solar de canal cilindro-parabólico	2
Figura 0.4: Esquema captador cilindro-parabólico	2
Figura 0.5: Esquema tanque almacenamiento de interfaz termoclina	3
Figura 2.1: Interfaz de trabajo del software Thermoflex	12
Figura 2.2: Pantalla de errores	13
Figura 2.3: Pantalla Excel del complemento ELINK	15
Figura 3.1: Esquema del ciclo principal de la central	18
Figura 3.2: Esquema ST Group 1	20
Figura 3.3: Diagrama H-S ST Group 1	20
Figura 3.4: Esquema ST Group 2	22
Figura 3.5 Diagrama H-S ST Group 2	22
Figura 3.6: Esquema ST Group 3	24
Figura 3.7 Diagrama H-S ST Group 3	24
Figura 3.8: Esquema ST Group 4	26
Figura 3.9 Diagrama H-S ST Group 4	26
Figura 3.10: Esquema ST Group 5	28
Figura 3.11 Diagrama H-S ST Group 5	28
Figura 3.12: Esquema ST Group 6	30
Figura 3.13 Diagrama H-S ST Group 6	30
Figura 3.14: Esquema ST Group 7	32
Figura 3.15 Diagrama H-S ST Group 7	33
Figura 3.16: Diagrama pérdidas en el escape ST Group 7	33
Figura 3.17: Esquema Precalentador 8	37
Figura 3.18: Diagrama T-Q Precalentador 8	37
Figura 3.19: Esquema Precalentador 9	38
Figura 3.20: Diagrama T-Q Precalentador 9	38
Figura 3.21: Esquema Precalentador 10	39
Figura 3.22: Diagrama T-Q Precalentador 10	39
Figura 3.23: Esquema Precalentador 11	40
Figura 3.24: Diagrama T-Q Precalentador 11	40
Figura 3.25: Esquema Precalentador 12	41
Figura 3.26: Diagrama T-Q Precalentador 12	41

Figura 3.27: Esquema Desaireador	42
Figura 3.28: Diagrama T-Q Desaireador	43
Figura 3.29: Esquema Condensador	45
Figura 3.30: Diagrama T-Q Condensador	45
Figura 3.31: Esquema Separador de mezcla	46
Figura 3.32: Esquema Intercambiador de calor vapor/vapor	47
Figura 3.33: Diagrama T-Q Intercambiador de calor vapor/vapor	47
Figura 3.34: Esquema Bomba 14	50
Figura 3.35: Curva Altura-Caudal Bomba 14	50
Figura 3.36: Esquema Bomba 17	52
Figura 3.37: Curva Altura-Caudal Bomba 17	52
Figura 3.38: Esquema aporte de agua 26	54
Figura 3.39: Esquema Aporte de agua 49 (modelo de vapor de sello)	55
Figura 3.40: Esquema aporte de agua 51	55
Figura 3.41: Sumidero de caudal 25	56
Figura 3.42: Sumidero de caudal 50	56
Figura 3.43: Esquema Agua de maquillaje	57
Figura 3.44: Esquema Válvula 31	58
Figura 3.45: Esquema Válvula 32	59
Figura 3.46: Esquemas Divisor (19) y Mezclador (18) de corriente	60
Figura 3.47: Esquema Tubería 38	61
Figura 3.48: Ciclo de vapor completo	63
Figura 3.49: Esquema Campo solar	66
Figura 3.50: Esquema Campo solar (almacenamiento)	71
Figura 3.51: Esquema Intercambiador de calor vapor/HTF 67	72
Figura 3.52: Diagrama T-Q Intercambiador de calor vapor/HTF 67	73
Figura 3.53: Esquema Intercambiador de calor HTF/vapor 68	75
Figura 3.54: Diagrama T-Q Intercambiador de calor HTF/vapor 68	75
Figura 3.55: Esquema Bomba HTF	77
Figura 3.56: Curva Altura-Caudal Bomba HTF	78
Figura 3.57: Esquema Elemento HTF Specification	80
Figura 3.58: Esquema Circuito HTF	82
Figura 4.1: Curva de ajuste $I_d - \dot{m}_b$	107
Figura 4.2: Curva de ajuste $I_d - P_{\min}$	108
Figura 5.1: Complemento ELINK (pantalla Excel)	110
Figura 5.2: Ejemplo de variables de análisis en Excel	113

$A^*$	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Fin de la demostración
e.o.c.	En cualquier otro caso
$e$	número $e$
$\operatorname{Re}$	Parte real
$\operatorname{Im}$	Parte imaginaria
$\operatorname{sen}$	Función seno
$\operatorname{tg}$	Función tangente
$\operatorname{arctg}$	Función arco tangente
$\operatorname{sen}$	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$\cos^x y$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
$S_a$	Función sampling
$\operatorname{sgn}$	Función signo
$\operatorname{rect}$	Función rectángulo
$\operatorname{Sinc}$	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivadas parciales respecto de $x$ e $y$
$x^\circ$ ó $x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$\operatorname{Pr}(A)$	Probabilidad del suceso $A$
:	Tal que
$\leq$	Menor o igual
$\geq$	Mayor o igual
$\setminus$	Barra invertida
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si
$\sim$	Del orden de
$\approx$	Aproximadamente igual



# 0 Introducción a la Tecnología Termosolar

La Energía Solar por Concentración (CSP) consiste en concentrar calor procedente del sol en una cierta superficie. Esta superficie será parte de un ciclo de potencia, bien directamente aportando la energía necesaria a, por ejemplo, un motor térmico, o bien, calentando algún tipo de HTF (fluido de transferencia térmica) que se usa a su vez para calentar agua y generar el vapor que impulsará una turbina. Este tipo de plantas pueden funcionar constantemente, si parte de ese calor es almacenado en momentos de irradiación elevada, es posible seguir produciendo vapor en momentos de ausencia de irradiación solar.

Hay diversas tecnologías de concentración solar, pero a día de hoy, existen 3 tipos principales de centrales termosolares:

- Centrales de torre: Un conjunto de heliostatos (espejos planos) concentran el calor del sol sobre un receptor central montado en la parte superior de una torre de más de 100 metros de altura. El fluido que circula por el receptor (normalmente sales fundidas) absorbe la radiación solar altamente concentrada y la convierte en energía térmica, para ser utilizada en la generación de vapor, que pone en funcionamiento la turbina para la producción de energía eléctrica.



Figura 0.1: Central solar de torre

- Centrales de disco Stirling: Una serie de discos concentradores parabólicos dirigen los rayos solares a un motor Stirling localizado en el foco del paraboloide. Cada unidad productora es independiente. Esto hace que esta tecnología tenga algunas similitudes con la forma de generación eléctrica de las placas fotovoltaicas desde el punto de vista de la explotación de la planta, ya que la complejidad de la operación es pequeña, lo que posibilita una automatización completa.



Figura 0.2: Central solar de discos Stirling

- Centrales de canal cilindro-parabólico: Reflectores en forma de canal de sección parabólica, dispuestos en hileras horizontales y en cuyos focos están situados unos tubos colectores por los que circula el fluido de transferencia de calor (aceite térmico sintético), concentran la luz solar sobre dichos tubos, lo que eleva la temperatura del aceite. El aceite caliente se emplea para vaporizar agua que, conducida a una turbina de vapor, acciona un generador que inyecta la energía eléctrica a la red.



Figura 0.3: Central solar de canal cilindro-parabólico

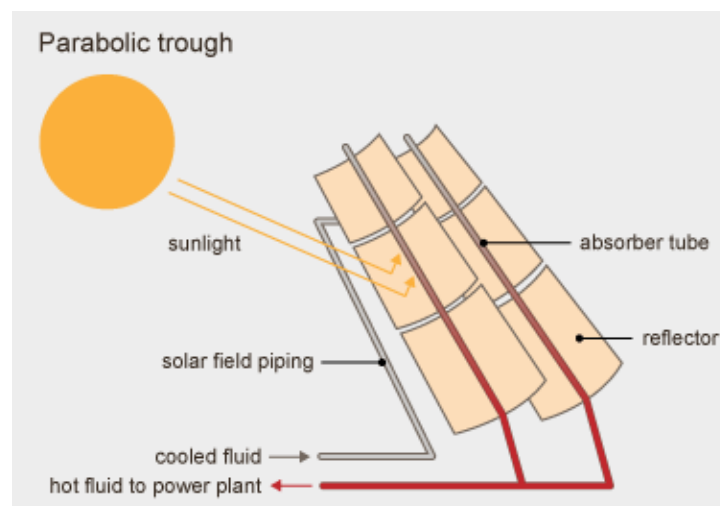


Figura 0.4: Esquema captador cilindro-parabólico



Las centrales de disco Stirling no son compatibles con el almacenamiento de energía térmica, pero tanto las de torre como las de canal cilindro-parabólico sí. Lo más común es dirigir parte del fluido térmico caliente a un tanque de almacenamiento, y la otra parte, al ciclo. En momentos en los que la irradiación solar sea baja o nula (durante la noche), se descargará el almacenamiento usando la energía térmica que aún conserva el fluido para seguir produciendo vapor que alimente la turbina. Una vez cedida la energía térmica, el fluido “frío” se almacenará en otro tanque, encargado de regular el aporte del HTF al circuito.

En ocasiones, se utiliza un solo tanque de almacenamiento para el fluido frío y el caliente. Estos tanques presentan una interfaz termoclina móvil que separa el fluido caliente del frío, valiéndose de la diferencia de densidad entre ambos. Este tipo de tecnología presenta en principio mayores inconvenientes que el almacenamiento en 2 tanques. Sin embargo, supone una mejora de espacio conformando sistemas de almacenamientos más compactos.

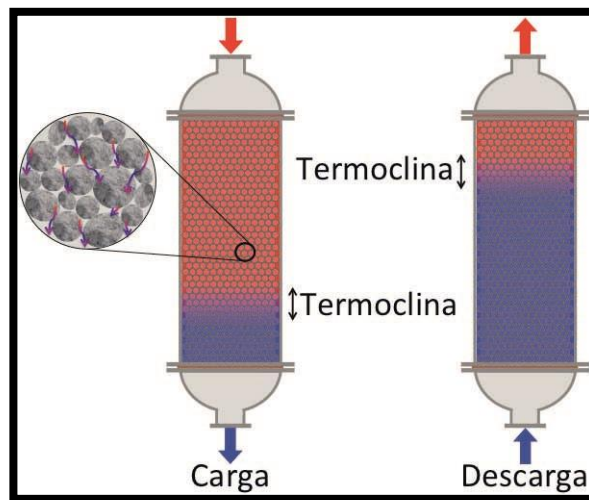


Figura 0.5: Esquema tanque almacenamiento de interfaz termoclina



# 1 Proyecto CGN-D 55MW Solar Thermal Generation

---

## 1.1 Generalidades del proyecto

El proyecto CGN-D 55MW Solar Thermal Power Generation consiste en una planta de Generación Eléctrica Solar Térmica con Almacenamiento Térmico, la cual está basada en la captación de energía solar mediante un campo solar de colectores parabólicos (Parabolic Trough Collector, PTC) que calientan un fluido térmico (HTF). Éste a su vez permite generar vapor mediante unos intercambiadores HTF-agua/vapor. El exceso de potencia térmica recibida por el campo solar se deriva al sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas para ser empleada en los períodos de producción en los que hay poca o ninguna radiación solar.

El vapor producido es conducido a la unidad de alta presión (HP) de la turbina de vapor. El vapor saliente del cuerpo de alta de la turbina será conducido al tren de recalentamiento y de ahí al cuerpo de baja presión (LP) de la turbina. El vapor de la descarga será conducido a un condensador refrigerado por agua. La refrigeración del condensador será realizada mediante torres de refrigeración.

El alternador accionado por la turbina genera la energía eléctrica que es introducida en la red de alta tensión a través de la subestación.

La planta, con una potencia nominal de 55 MW dispondrá de:

- Un campo solar, con colectores parabólicos (Solar Parabolic Trough Collector, SPTC) dispuestos en paralelo.
- Un bloque de potencia compuesto por:
  - Un tren de generación de vapor (Steam Generating System).
  - Un grupo turbina de vapor y generador.
  - Un sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas (Thermal Storage System)
  - Un sistema de fluido térmico, Heat Transfer Fluid (HTF).
  - Equipos Asociados al bloque de potencia, al ciclo de agua de vapor y a los sistemas auxiliares.

### **- Características Generales:**

En condiciones nominales de funcionamiento, la planta dará una potencia en bornes de alta tensión del transformador de 55.000 kW. La turbina está diseñada para dar una potencia máxima de 60MWe y una potencia mínima de 13,75 MWe.

**- Parámetros generales de la planta:**

- Potencia Bruta: 55 MWe
- Tensión: 110 kV
- Combustible auxiliar: Gas Natural
- Presión vapor sobrecalentado: 102.5 Bar (a)
- Temperatura vapor sobrecalentado 383 °C
- Presión vapor recalentado: 18.9 Bar(a)
- Temperatura vapor recalentado: 383 °C
- Presión Condensador: 0.04 Bar(a)
- Refrigeración principal:
  - Fluido refrigerador Agua
  - Temperatura del agua de entrada 12,6 °C
  - Salto de temperatura en condensador 8 °C

## **1.2 Localización, Condiciones ambientales medias y Año meteorológico tipo**

La planta está ubicada en un Parque Solar Industrial, en una provincia del cuadrante noroeste de China. La zona cuenta con un típico clima continental, seco, con lluvias poco frecuentes y temperaturas muy bajas. Tiene una gran amplitud térmica diaria, cuenta con abundante sol y viento frecuente.

### **- Condiciones ambientales:**

- Temperatura ambiente media 4 °C
- Rango de temperatura ambiente - 27,9 °C a 34.5 °C
- Humedad relativa media 38 %
- Humedad relativa mínima 0 %
- Altitud 2981,5 m
- Máxima velocidad del viento 26,9 m/s

Los archivos correspondientes al año meteorológico tipo no se adjuntan en este documento debido a su extensión, pero están disponibles en formato .xls en la versión informática.

### **1.3 Sistemas y Equipos**

#### **- Campo Solar:**

El campo solar está dimensionado para una capacidad máxima en la cual durante los períodos de radiación máxima será posible la generación de energía eléctrica nominal de 55MWe y el almacenamiento de potencia térmica nominal del sistema TES. La temperatura del HTF a la salida del campo solar será de 393°C

El campo solar está formado por 190 lazos, cada uno de ellos constituido a su vez por 4 unidades de colectores (Solar Collection Assemblies SCA). Cada SCA tiene una longitud de 148.5m, un tamaño de apertura de 5.77m, y una distancia de 1.71m. La distancia entre cada lazo es de 17 m. Cada unidad del colector está constituida por 12 submódulos, denominados SCE (Solar Collector Elements).

#### **- Sistema HTF:**

El fluido térmico empleado es el DOWNTHERM A. En el sistema HTF las bombas principales de HTF hacen circular el aceite térmico a través del campo solar, el tren de generación y el sistema de almacenamiento térmico.

#### **- Calderas auxiliares de aceite térmico:**

Las calderas de aceite térmico proporcionarán protección frente al congelamiento del fluido (HTF) durante el periodo de tiempo en el que no hay radiación solar y el modo descarga de sales no está disponible. Las calderas emplearán gas natural como combustible.

Cada una de las 3 calderas tiene una potencia de 16,3 MWt brutos, que podrán funcionar por separado, o en conjunto, en función de las necesidades requeridas.

Estas calderas también pueden funcionar como apoyo en la producción de energía junto con la energía obtenida de la radiación solar, en los períodos de menor radiación, calentamiento rápido, etc.

#### **- Sistema almacenamiento térmico:**

El sistema de almacenamiento térmico está diseñado para almacenar una capacidad de 1.300 MWht netos. Los intercambiadores están diseñados para proporcionar una demanda de calor de 154 MWt en el modo carga, calentando las sales frías de 286°C a 386°C. Por otro lado, el modo de descarga se proporciona una potencia térmica de 105 MWt. En este modo el HTF se calienta de 280 a 380°C.

El medio de almacenamiento es una mezcla eutéctica de sales de nitrato, un 60% de  $\text{NaNO}_3$  y un 40% de  $\text{KNO}_3$ . El sistema incluirá dos tanques de almacenamiento de sales, tres intercambiadores de calor sales / HTF, y bombas de sales que recirculan las sales fundidas de un tanque a otro a través de los intercambiadores.

El propósito principal del sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) es permitir la producción de electricidad después de la puesta del sol. Es necesario también que el TES sea también capaz de aportar energía térmica al HTF en caso de reducción o interrupción de la radiación solar durante un corto periodo de tiempo (transiciones de nubes, etc.). Se resumen a continuación los 2 modos principales de operación para el sistema TES:

- Carga:

En el caso de la energía térmica procedente del campo solar sea mayor al necesario por el tren de generación para la producción de los 55 MWe brutos, el sistema TES recibirá los excedentes de calor a través de la transferencia de calor entre el HTF y las sales. El tiempo de carga depende de la energía disponible en el campo solar, considerando como ratio máximo de carga los 154 MWt. El modo carga se detiene cuando el tanque de frío alcanza el nivel mínimo. La temperatura de las sales a la entrada del tanque caliente (386°C) es la consigna para calcular el caudal de sales frías a bombear.

- Descarga:

En el caso de que la energía térmica procedente del campo solar sea menor a la energía térmica mínima necesaria para la producción eléctrica, el sistema de sales pasará a modo descarga transfiriendo la energía térmica almacenada en las sales al HTF. La cantidad de calor proporcionada por el TES resulta de la exigencia de que la suma de la energía térmica del campo solar y térmica energía de la TES es mayor que la energía mínima requerida desde el bloque de potencia. El modo descarga del sistema TES también se activará antes del amanecer. El tiempo de descarga dependerá de la demanda de energía de la turbina, considerando como ratio máximo de descarga los 105 MWt. El modo de descarga se detiene cuando se alcanza el nivel mínimo en el tanque de sales caliente. La temperatura de las sales a la entrada del tanque frío (286°C) es la consigna para calcular el caudal de sales calientes a bombear. Mientras que el caudal de HTF se regula para lograr una temperatura de HTF de 280°C a la salida del tren de generación de vapor.

**- Sistema de generación de vapor**

El sistema del tren de generación se divide en tres etapas: Pre calentamiento, generación de vapor y sobrecalentamiento.

**- Sistema de Recalentamiento**

El vapor de exhaust de la turbina de alta presión es recalentado en un intercambiador carcasa-tubo tipo Hairpyn (el vapor circula por los tubos y el HTF por la carcasa).

## **1.4 Modificaciones en el proceso de modelado**

Los apartados anteriores recogen la memoria descriptiva inicial proporcionada por la empresa a cargo del proyecto. Si bien, durante el proceso de modelado surgieron diversas dudas que fueron consultadas a los responsables del equipo del proyecto que conllevaron modificaciones que se fueron implementando sobre la marcha en nuestro modelo. Incluso a día de hoy, cuya redacción de esta memoria tiene lugar, todavía es posible que tuvieran lugar nuevas modificaciones. Por este motivo, hace unos meses, se tomó la decisión de dar por finalizada la etapa de modelado atendiendo a las decisiones en curso en tal momento.

A partir de entonces, se procedió con la parte final de nuestro estudio, que suponía el análisis dinámico de nuestra planta a lo largo de un año tipo.

Todas las características de los equipos serán analizadas y detalladas con posterioridad. No obstante, queríamos hacer notar que amén de otras muchas modificaciones secundarias, nuestro modelo del campo solar se ha realizado de acuerdo a la definición de un múltiplo solar igual a 2. Hecho que conlleva que en el punto de diseño con  $850 \text{ W/m}^2$  de radiación solar, se obtengan 55 MW de potencia bruta y 139 MW reconducidos al almacenamiento. Dato que difiere del inicial, expuesto en la memoria descriptiva (a saber, 154 MW). Similarmente, los cambios relativos al tamaño o número de lazos de canal parabólico serán comentados posteriormente.



## 2 Software Thermoflex 25

---

El software en el que trabajaremos es el Thermoflex 25, actualizado en su versión de 2015. Dicho programa permite de forma genérica, mediante una amplia librería de equipos e ítems, diseñar plantas y redes complejas de tránsito y operación de fluidos. Está especialmente indicado para su uso en sistemas termodinámicos, como son los ciclos de potencia. La pantalla básica de operación del software se presenta en la *figura 2.1*, en la que se señalan los componentes y herramientas básicas del programa.

Si bien, entre los propósitos de este documento no se encuentra el de detallar un manual de uso de este software, por lo que no se abordan explicaciones relacionadas con la selección de unidades o tabulación de resultados. No obstante, sí que vamos a resumir los pasos generales para la creación de modelos.

### 2.1 Análisis Termodinámico y Modo Ingeniería

Para construir nuestro modelo empezaremos por seleccionar en la librería de la ficha "*Edit Drawing*" todos los equipos necesarios de nuestra planta. Por defecto, todos los equipos aparecen operando en el modo **Análisis Termodinámico**, que es un modo en el que el usuario puede definir aspectos generales de éstos (las opciones variarán de un equipo a otro). El objetivo de este modo no es más que el de simplificar el funcionamiento de los mismos y permitirles operar inicialmente bajo ciertas hipótesis de idealización.

Una vez seleccionados todos los componentes, pasaremos a definir las conexiones entre los mismos. El programa no puede operar si el sistema tiene alguna línea abierta o carente de conexión, por lo que, tras el conexionado, el programa comprobará y nos indicará si el "dibujo" es coherente, y podremos pasar a la edición de parámetros en la ficha "*Edit Inputs*".

En este momento ya podríamos intentar realizar una simulación inicial, aunque el programa trabajaría con los parámetros de los equipos predeterminados por defecto. Lo habitual es que los valores de nuestro modelo difieran de ellos, por lo que deberemos establecer los requeridos en el menú correspondiente de cada equipo.

Como comentábamos, el modo de análisis termodinámico ofrece limitaciones. Para poder modificar un mayor número de parámetros será preciso seleccionar el **Modo Ingeniería**.

Es posible para un mismo modelo tener equipos trabajando en el modo Análisis Termodinámico y otros en el Modo Ingeniería simultáneamente. Esto será recomendable si desconocemos ciertos parámetros de algún equipo en concreto, o bien, si tenemos poca información sobre él.

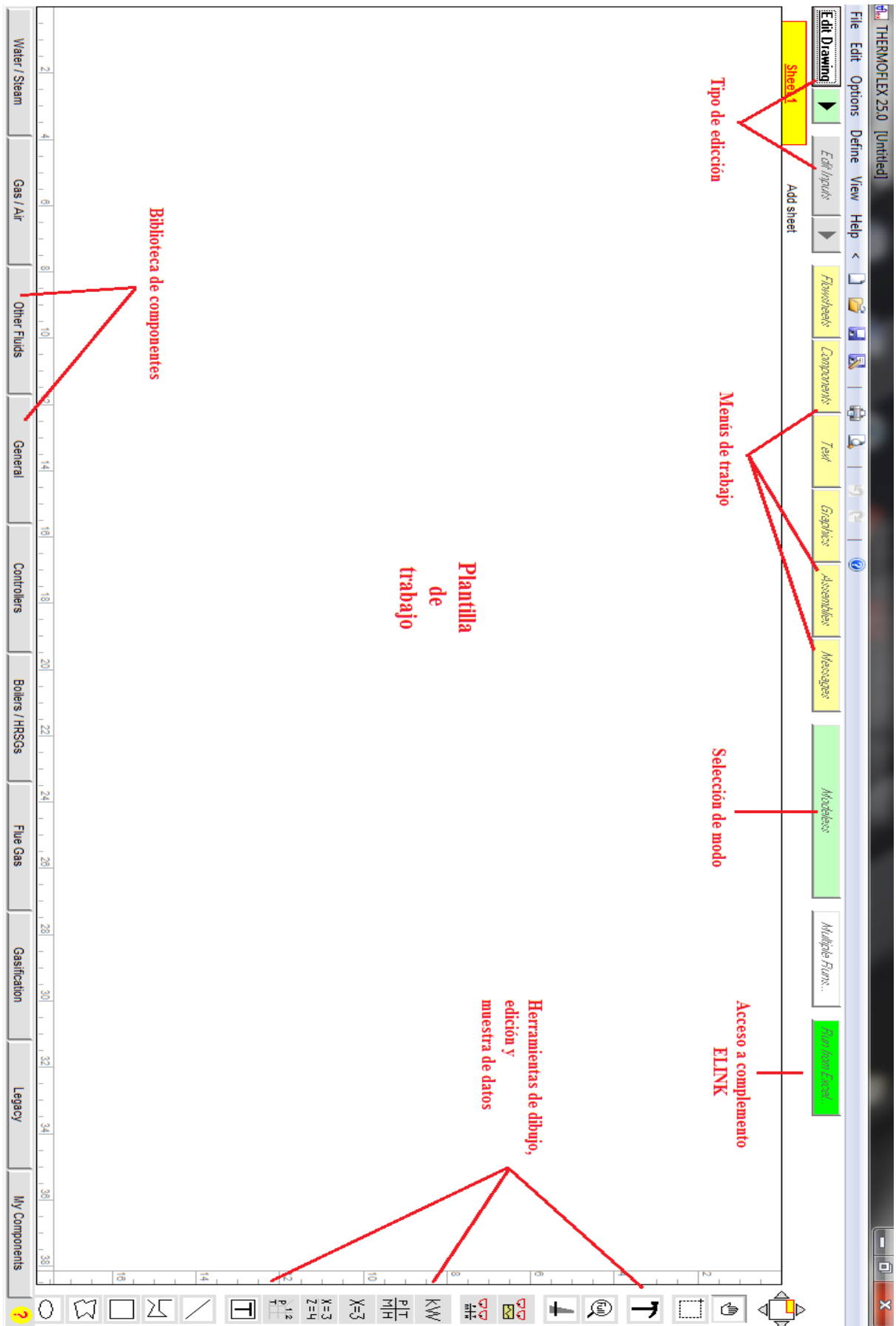


Figura 2.1: Interfaz de trabajo del software Thermoflex

Una de las virtudes de este software es que intentará resolver por sí mismo inexactitudes o contradicciones dadas en el sistema. Por ejemplo, debido a una definición de parámetros que conlleve balances erróneos en algún equipo. Es por ello que en general se nos permitirá establecer prioridades en las corrientes de entrada/salida de los equipos, por lo que, en caso de conflicto, prevalecerá el cálculo asociado a la corriente con mayor prioridad, siendo modificados los demás.

Concluida la definición, podremos volver a simular nuestro modelo. Normalmente el programa nos indica que se modificarán ciertos valores inicialmente para poder realizar los cálculos iterativos correspondientes. Por defecto, el programa realizará 60 iteraciones en el cálculo de cada variable, momento en el que, si el valor de dicho parámetro no ha convergido, se solicitará la confirmación del usuario para realizar 60 más. Tal evento puede tener lugar hasta en 5 ocasiones, ya que una vez alcanzadas las 300 iteraciones, el cálculo exacto de dicha variable se detendrá, se aproximará en el último rango determinado por el programa, y mostrará la correspondiente alerta por el suceso. Queremos remarcar que ese límite de 300 iteraciones es para cada variable en los distintos pasos del cálculo, de modo que, si iniciásemos una nueva simulación, el programa partiría de la última acotación del valor de dicha variable, disponiendo de 300 nuevas iteraciones.

No obstante, si por algún motivo hay que volver a la ficha "Edit Drawing" para realizar alguna modificación en el "dibujo" del modelo, todos los valores serán actualizados y su cálculo partirá desde el principio de los valores seleccionados por el usuario o presentes en la máquina por defecto.

Terminados los cálculos se activará una pantalla en la que se nos detallan los posibles problemas que han existido con las iteraciones. Los cuatro tipos de notificaciones por orden de prioridad son: *Errors* (Errores), *Warnings* (Alertas), *Advisories* (Avisos) y *Remarks* (Observaciones) (ver figura 2.2). Mientras que las observaciones son admisibles en la mayoría de los casos, las otras notificaciones deben ser analizadas y corregidas, ya que normalmente implican cálculos erróneos en el sistema, inexactitudes, y, en definitiva, que nuestro modelo no es válido.

Se puede remarcar que este menú de notificaciones aparecerá de forma similar, aunque distinto formato, incluso cuando operamos el fichero desde el complemento ELINK, el cual se explica más más adelante.

Una vez concluidos y revisados los cálculos, el programa permite crear tablas para presentar todos los datos requeridos, tanto los definidos por el usuario como los calculados por la máquina. Estas tablas son interactivas y se actualizarán automáticamente tanto si se realizan modificaciones en este modo, o en el que se explica en el siguiente apartado.

Llegados a este punto, ya dispondremos de un modelo completo en cuanto a la operación de nuestro sistema en el punto de diseño. No obstante, para poder estudiar cómo opera el sistema en condiciones fuera del punto de diseño, deberemos pasar al modo **Off-design**.

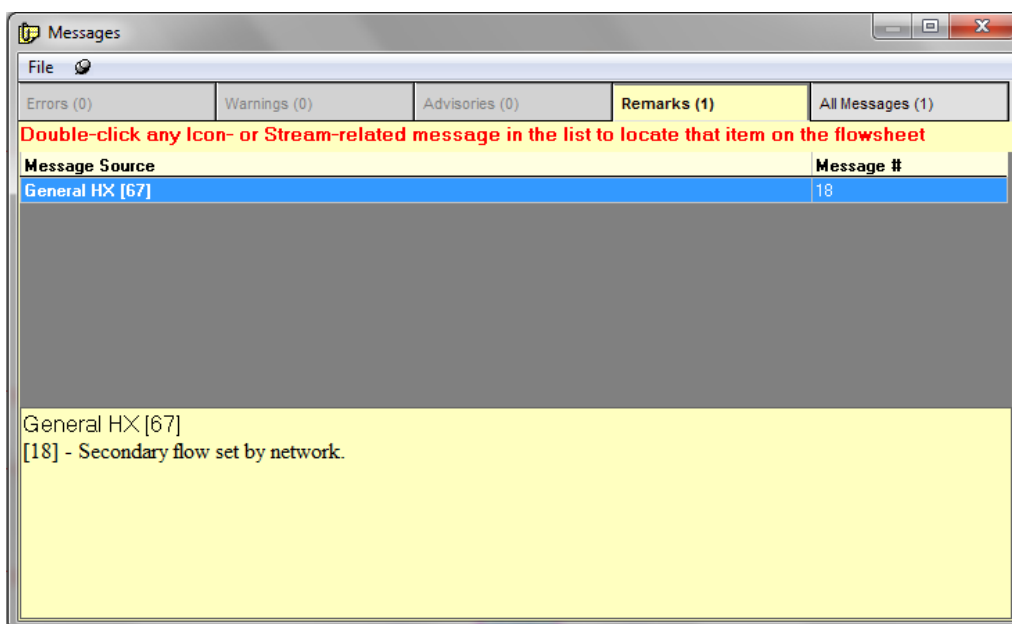


Figura 2.2: Pantalla de errores

## **2.2 Modo Análisis Off-design**

Como ya se ha indicado varias veces, la utilidad de este modo radica en la posibilidad de estudiar cómo se comporta nuestro sistema ante condiciones distintas de las de diseño.

Para ello podremos modificar nuevos parámetros de algunos de los equipos que no estaban disponibles con anterioridad, con la salvedad de que no podrán cambiarse aquellos relativos al diseño intrínseco del sistema. En otras palabras, ahora podremos variar aquellos parámetros que sería posible modificar en la realidad mientras nuestro sistema esté en funcionamiento, y también aquellos parámetros asociados a las condiciones de entrada externas, tales como pueden ser la disponibilidad de combustible, o la temperatura ambiente.

Uno de sus usos es la posibilidad de analizar el funcionamiento de sistemas de potencia trabajando a carga parcial. Éste será el caso en el objetivo que persigue nuestro estudio.

Debido a las posibilidades de ajuste de parámetros que aún existe en los equipos, así como a los valores que el usuario puede imponer sobre el sistema, como por ejemplo, cierta presión a la entrada de un determinado elemento, es habitual que durante los cálculos en este modo aparezcan de nuevo las notificaciones de irregularidades en el cálculo iterativo detalladas en el apartado previo.

Otra de las virtudes de este software es que los equipos de la librería se ajustan a los límites de equipos reales, como por ejemplo que no es posible alcanzar relaciones de compresión infinitas con un compresor. Si bien, aunque no hemos investigado a fondo el software, entendemos que los límites son acordes en general sólo a los límites que establecen los principios termodinámicos, y no tanto a los que marca la tecnología actual. Hecho que en cualquier caso tiene sentido, ya que, de otro modo ante mejoras futuras, este software quedaría rápidamente obsoleto.

Concluido el análisis en Off-design, podemos establecer correlaciones "experimentales" que nos permitan analizar posteriormente y con mayor celeridad el funcionamiento de nuestro sistema ante condiciones de entrada dinámicas. Para ello, será de gran utilidad el complemento ELINK para Excel del que dispone nuestro software. El cual se detalla a continuación.

## 2.3 Complemento ELINK

Este complemento permite en primera instancia exportar a Excel cualquier tabla de parámetros desde cualquier programa de la gama de Thermoflow, y en concreto, del nuestro, Thermoflex 25, así como realizar cálculos y operaciones, editar entradas y obtener resultados sin necesidad de abandonar el entorno de Excel.

El complemento opera directamente sobre nuestro fichero .tfx y está pensado para realizar análisis en nuestro modelo provocados por una serie de parámetros que podemos preseleccionar, así como visualizar los resultados de otras variables también elegidas. Otra ventaja de este complemento, además de la celeridad en el análisis de variables en régimen de condiciones de entrada dinámicas a nuestro sistema, se encuentra precisamente en su capacidad de trabajar directamente con el motor de cálculo de Thermoflex desde una interfaz sencilla, en la que, incluso si dicha interfaz predeterminada resultase compleja, sería posible programar en Visual Basic otra más adecuada para el uso de un operario con conocimientos limitados en la materia. En la *figura 2.3* se muestra una pantalla de ejemplo de dicho complemento.

	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>E-LINK 14.0</b>		<b>Base Case</b>	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
2	Copyright © 1999-2004, Thermoflow Inc.						
3	Base Case: C:\Tflow14\MYFILES\gtpro.gtp						
4	Loaded: 07-01-2004 : 16:23:04						
6	Computation Message		<b>OK</b>	OK	OK	OK	OK
7	<b>INPUT VARIABLE DESCRIPTION</b>	<b>Units</b>	<b>Input</b>	Input	Input	Input	Input
8	Ambient temperature	°F	<b>59</b>	40	50	60	70
10	<b>OUTPUT VARIABLE DESCRIPTION</b>	<b>Units</b>	<b>Output</b>	Output	Output	Output	Output
11	Ambient pressure	psia	<b>14.7</b>	14.7	14.7	14.7	14.7
12	Ambient temperature	°F	<b>59</b>	40	50	60	70
13	Ambient relative humidity	%	<b>60</b>	60	60	60	60
14	Plant gross output	kWe	<b>58033</b>	61043	59466	57864	56200
15	Plant net output	kWe	<b>56401</b>	59376	57817	56234	54650
16	Plant gross LHV heat rate	BTU/kWh	<b>7082</b>	7080	7079	7082	7082
17	Plant net LHV heat rate	BTU/kWh	<b>7287</b>	7279	7281	7287	7290
18	Plant gross elec eff	%	<b>48.18</b>	48.19	48.2	48.18	48.1
19	Plant net elec eff	%	<b>46.83</b>	46.88	46.87	46.83	46.7
20	PURPA eff	%	<b>46.83</b>	46.88	46.87	46.83	46.7
21	CHP eff	%	<b>46.83</b>	46.88	46.87	46.83	46.7
22	Power gen. eff on chargeable energy	%	<b>46.83</b>	46.88	46.87	46.83	46.7
23	Canadian Class 43 heat rate	BTU/kWh	<b>7858</b>	7856	7855	7858	7860
24	Plant total fuel HHV input	kBTU/hr	<b>456018</b>	479574	467091	454699	441700
25	Plant total fuel LHV input	kBTU/hr	<b>410970</b>	432199	420950	409782	398100
26	Plant total fuel HHV/LHV input		<b>1.11</b>	1.11	1.11	1.11	1.11
27	Total auxiliary load and transformer loss	kWe	<b>1632</b>	1667.2	1648.7	1630	1610
28	Fuel compressor	kWe	<b>239.9</b>	252.3	245.7	239.2	232.0
29	Supercharging fan	kWe	<b>0</b>	0	0	0	0

Figura 2.3: Pantalla Excel del complemento ELINK



## 3 Modelado en el Punto de Diseño

---

Para el modelado del ciclo de vapor, partimos de un esquema facilitado por la empresa a cargo del proyecto, el cual está realizado usando el software "System Advisor Model (SAM)". Este esquema se muestra en la *figura 3.1*. Usando este esquema como base y las indicaciones de la memoria descriptiva, debemos proceder a introducir todos los equipos y elementos que formarán parte del mismo. En el caso de nuestro proyecto, existen 2 circuitos claramente diferenciados: el circuito del vapor/agua, y el circuito del HTF. Es por ello que serán presentados por separado.

Nuestra tarea por tanto será adaptarnos al esquema suministrado, tratando de conseguir la mayor similitud posible respecto a todas las corrientes que aparecen en dicho esquema.

El desglose inicial de los distintos elementos se realiza explicando brevemente el funcionamiento de cada uno de ellos, y acto seguido se adjunta una tabla en la que se detallan el número de elementos similares, así como las características que fueron definidas en primera aproximación para iniciar el cálculo. A continuación de ello se exponen los resultados del cálculo llevado a cabo por el software en forma de tablas y/o gráficas cuando corresponde. Nótese que al modelar nos tomamos la licencia de definir elementos inexistentes con tal de simular la realidad, y de la misma forma, se omiten otros que ciertamente no aportan nada a nuestro diseño. Es por ello a partir de aquí, en este apartado, sólo se referirán los equipos y elementos con la disposición que se ha usado en la realización de este proyecto. Se excluyen de igual forma explicaciones relativas al porqué se usan ciertos elementos en lugar de otros, ya que se escapa del alcance de este documento por no ser el propósito de este estudio el constituir un manual explicativo de un proceso general de modelado, sino el documentar el trabajo realizado respecto a este proyecto en concreto.

### 3.1 Modelo del ciclo de vapor

El circuito de vapor presenta a su vez 2 partes principales con sus correspondientes conexiones entre sí: la turbina y el tren de precalentadores, además de por supuesto todos los demás elementos auxiliares, los cuales se definirán a lo largo de éste apartado.

El software numera los elementos en función del orden en que han sido agregados a la plantilla de trabajo. Es por esto que en las tablas que se presentan seguidamente, en ocasiones aparecen numeraciones discontinuas para elementos del mismo grupo. Sin embargo, esto no representa mayor problema, ya que, al no ser un modelo excesivamente grande, localizarlos en las plantillas de los correspondientes archivos .tfx es tarea sencilla. El número total de elementos de modelado (entre el ciclo de vapor y el de HTF) usados es de 78 unidades.

Igualmente, se definen 78 conexiones que interconectan todos los elementos. En adelante nos referiremos a ellas también como "corrientes" (streams). Se detallarán al final del capítulo.

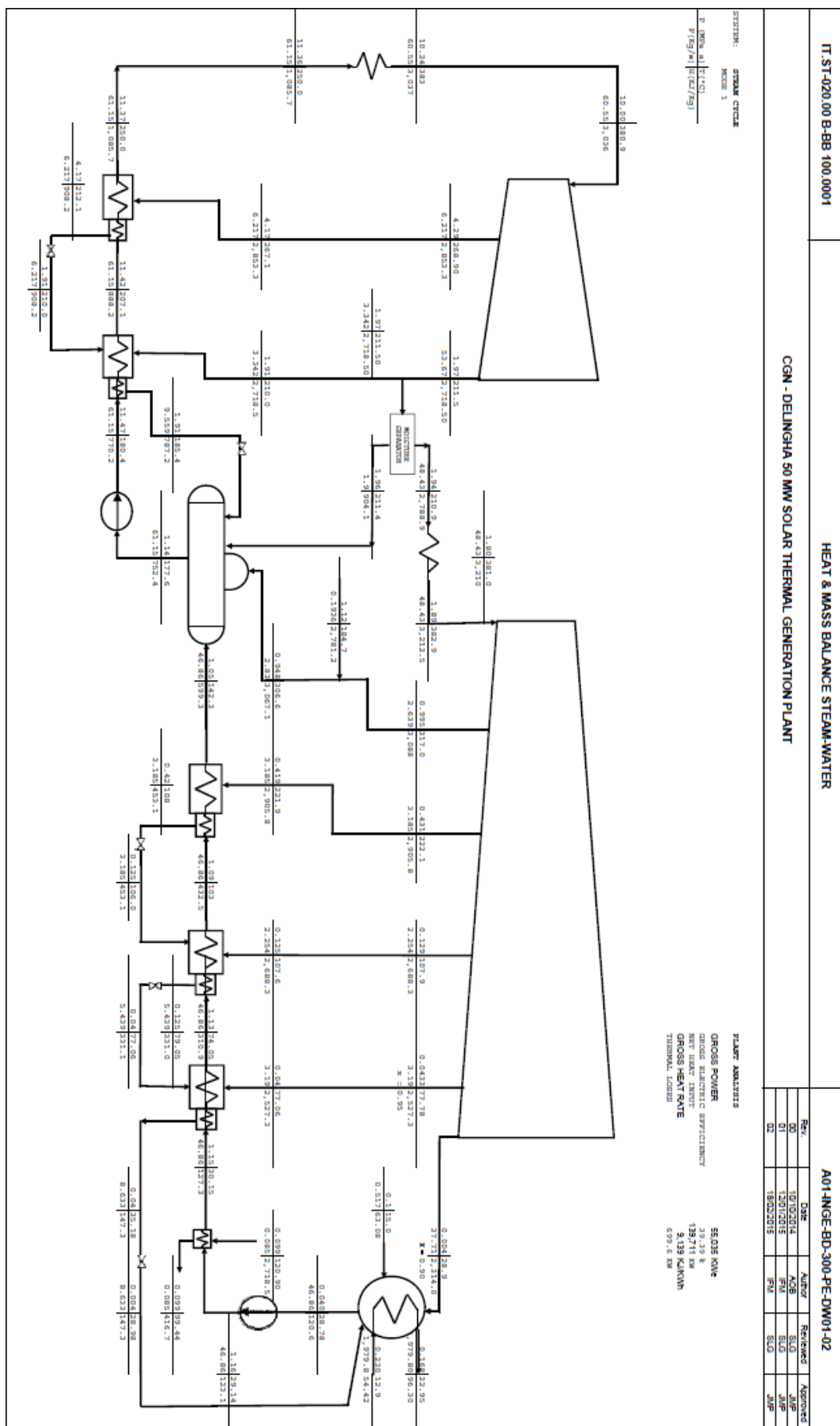


Figura 3.1: Esquema del ciclo principal de la central



**Equipos y elementos auxiliares del ciclo de vapor:**

**- Cuerpos de turbina (ST Group):**

Los cuerpos de turbina se modelan mediante el elemento "ST Group". Tenemos un cuerpo de alta con una extracción, y un cuerpo de baja con 4 extracciones. El cuerpo de alta se modela por tanto con 2 items y el de baja con 5.

Tabla 3.1: Parámetros (ST Group)

ST group	Specify inlet enthalphy	Design point pressure [bar]	Inlet pressure control	Inlet pressure drop [%]*	Mass flow especificed...	Inlet fixed flow
1	On	100,00	Sliding pressure	0	Directly	No
2	On	42,90	Sliding pressure	0	Directly	No
3	On	18,00	Sliding pressure	0	Directly	Yes**
4	On	9,95	Sliding pressure	0	Directly	No
5	On	4,31	Sliding pressure	0	Directly	No
6	On	1,29	Sliding pressure	0	Directly	No
7	On	0,433	Sliding pressure	0	Directly	No

\*La caída de presión a la entrada se modelará mediante el ítem "tubería" (pipe).

\*\* Nuestro parámetro de referencia en este modelo será el flujo de vapor (kg/s) a la entrada del cuerpo de baja de la turbina. Se comentará con más detalle al final de este apartado.

El conjunto de cuerpos de turbinas compone otro sistema auxiliar que suministra el vapor de sello a la turbina. Dicho vapor de sello se recoge posteriormente y se usa como un paso previo al tren de precalentamiento del vapor. Es por ello que los 7 elementos ST group, se ensamblan (ST Assembly) y se enlazan con un elemento "fuente de agua" (water source) que se definirá posteriormente.

Se muestra a continuación para cada grupo un esquema básico, una gráfica H-S de la expansión del vapor y una tabla resumen con todos los balances. Además de otra gráfica solo para el último grupo de las pérdidas a la salida de la turbina.

ST Group 1

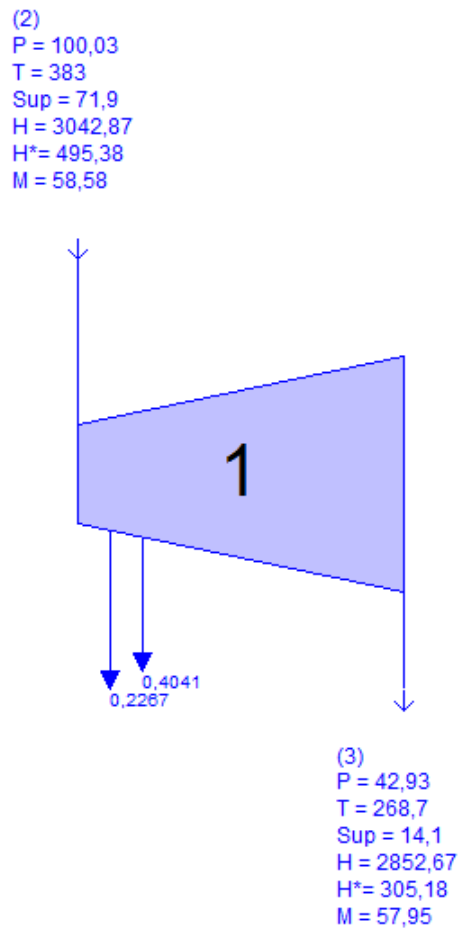


Figura 3.2: Esquema ST Group 1

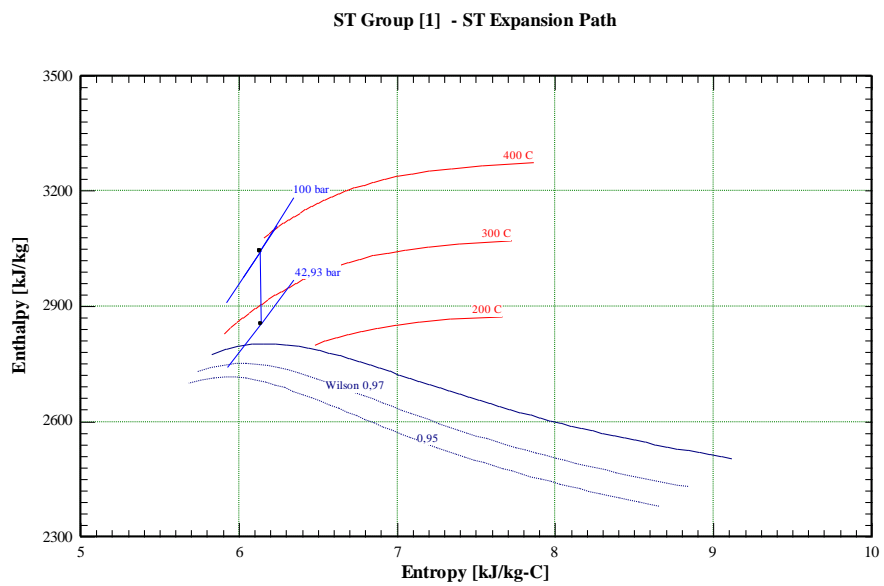


Figura 3.3: Diagrama H-S ST Group 1

Tabla 3.2: Variables ST Group 1

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [1]</b>		
Dry step efficiency	97,66	%
Group overall efficiency	97,79	%
Group blading efficiency	97,79	%
Expansion power	11023	kW
Shaft power	10995	kW
Mechanical loss	27,57	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	100	bar
Temperature	383	C
Massflow	58,58	kg/s
Enthalpy	3042,87	kJ/kg
Pressure after inlet loss	100	bar
<b>HP End Leakage</b>		
Leak out massflow	0,2267	kg/s
Leak out enthalpy	3042,87	kJ/kg
Leak out2 massflow	0,4041	kg/s
Leak out2 enthalpy	3042,87	kJ/kg
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	57,95	kg/s
Expansion line initial pressure	100	bar
Expansion line initial enthalpy	3042,87	kJ/kg
Expansion line end pressure	42,93	bar
Expansion line end enthalpy	2852,66	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	42,93	bar
Temperature	268,7	C
Massflow	57,95	kg/s
Enthalpy	2852,66	kJ/kg

ST Group 2

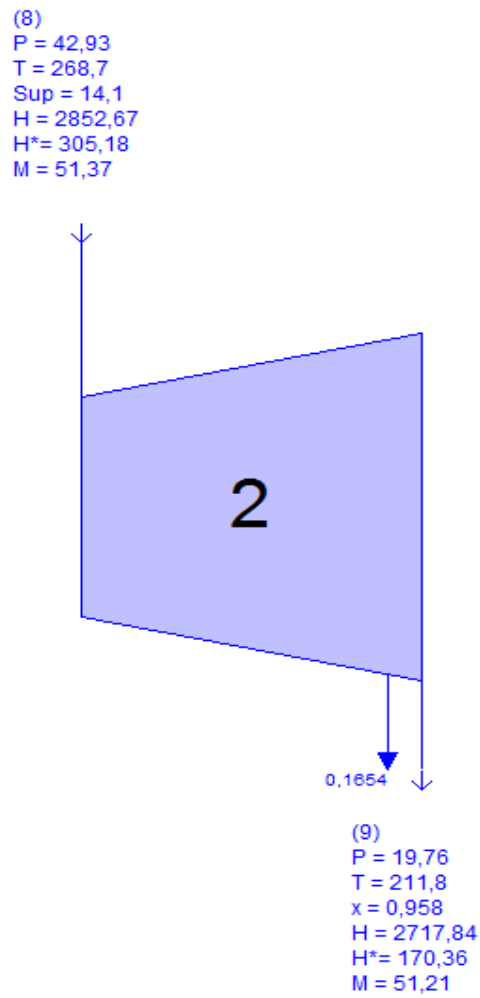


Figura 3.4: Esquema ST Group 2

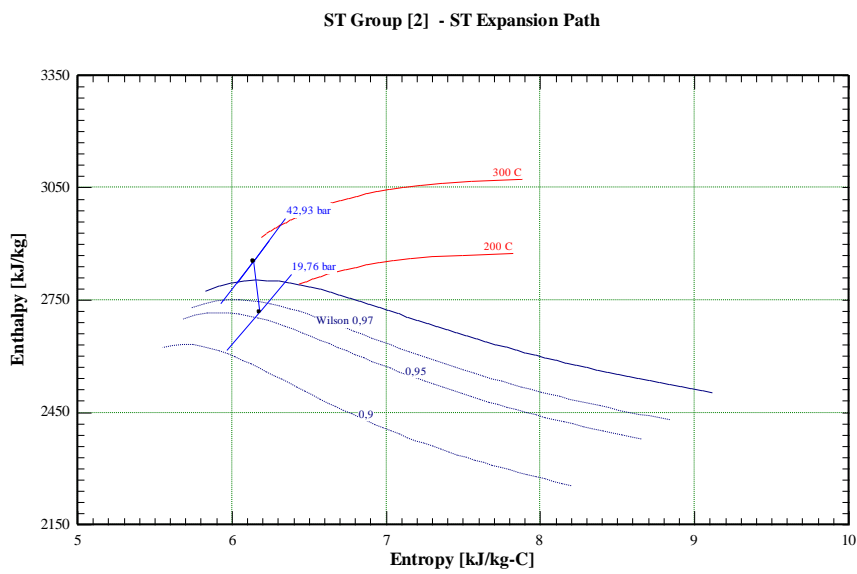


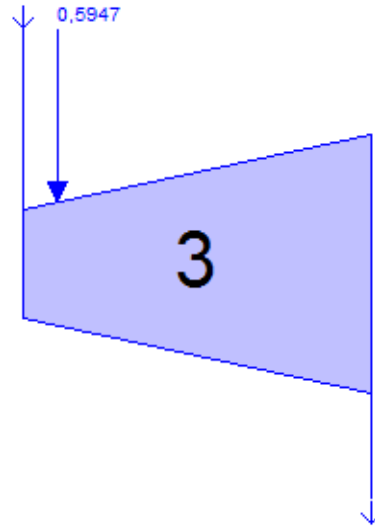
Figura 3.5 Diagrama H-S ST Group 2

Tabla 3.3: Variables ST Group 2

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [2]</b>		
Dry step efficiency	88,11	%
Group overall efficiency	87,93	%
Group blading efficiency	87,93	%
Expansion power	6926	kW
Shaft power	6909	kW
Mechanical loss	17,29	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	42,93	bar
Temperature	268,7	C
Massflow	51,37	kg/s
Enthalpy	2852,67	kJ/kg
Pressure after inlet loss	42,93	bar
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	51,37	kg/s
Expansion line initial pressure	42,93	bar
Expansion line initial enthalpy	2852,67	kJ/kg
Expansion line end pressure	19,76	bar
Expansion line end enthalpy	2717,84	kJ/kg
<b>LP End Leakage</b>		
Leak out massflow	0,1654	kg/s
Leak out enthalpy	2717,84	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	19,76	bar
Temperature	211,8	C
Massflow	51,21	kg/s
Enthalpy	2717,84	kJ/kg
Steam quality	0,9576	

ST Group 3

(26) - Fixed M  
 P = 18,00  
 T = 383,4  
 Sup = 176,2  
 H = 3215,14  
 H\* = 667,65  
 M = 48,43



(27)  
 P = 9,952  
 T = 317  
 Sup = 137,3  
 H = 3088,02  
 H\* = 540,54  
 M = 49,02

Figura 3.6: Esquema ST Group 3

ST Group [3] - ST Expansion Path

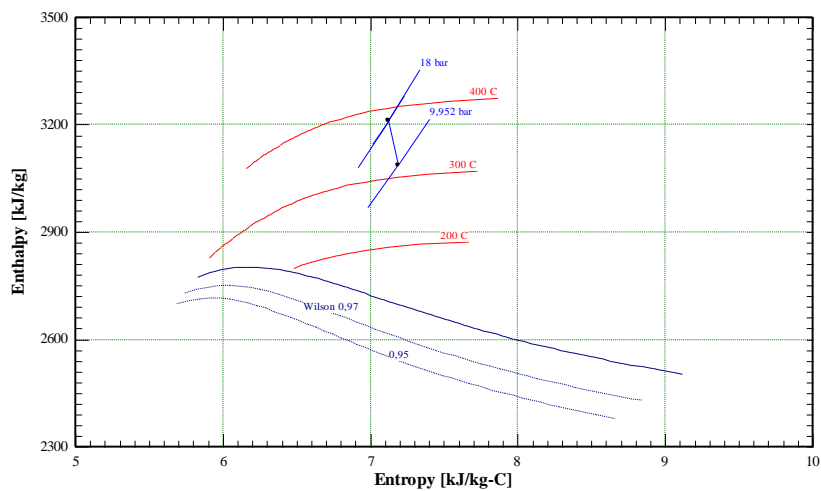


Figura 3.7 Diagrama H-S ST Group 3

Tabla 3.4: Variables ST Group 3

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [3]</b>		
Dry step efficiency	75,69	%
Group overall efficiency	76,52	%
Group blading efficiency	76,52	%
Expansion power	6129	kW
Shaft power	6114	kW
Mechanical loss	15,33	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	18	bar
Temperature	383,4	C
Massflow	48,43	kg/s
Enthalpy	3215,14	kJ/kg
Pressure after inlet loss	18	bar
<b>HP End Leakage</b>		
Leak in massflow	0,5947	kg/s
Leak in enthalpy	3042,87	kJ/kg
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	49,02	kg/s
Expansion line initial pressure	18	bar
Expansion line initial enthalpy	3213,05	kJ/kg
Expansion line end pressure	9,952	bar
Expansion line end enthalpy	3088,02	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	9,952	bar
Temperature	317	C
Massflow	49,02	kg/s
Enthalpy	3088,02	kJ/kg

ST Group 4

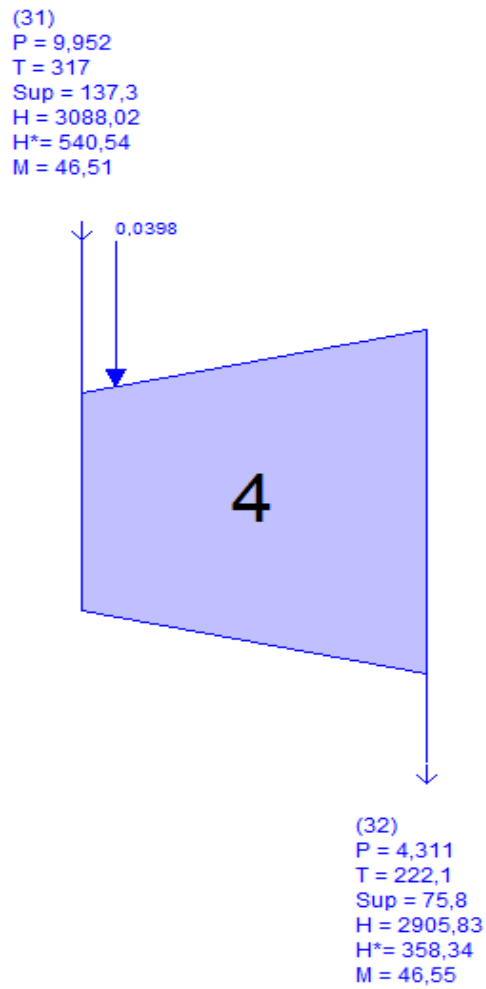


Figura 3.8: Esquema ST Group 4

ST Group [4] - ST Expansion Path

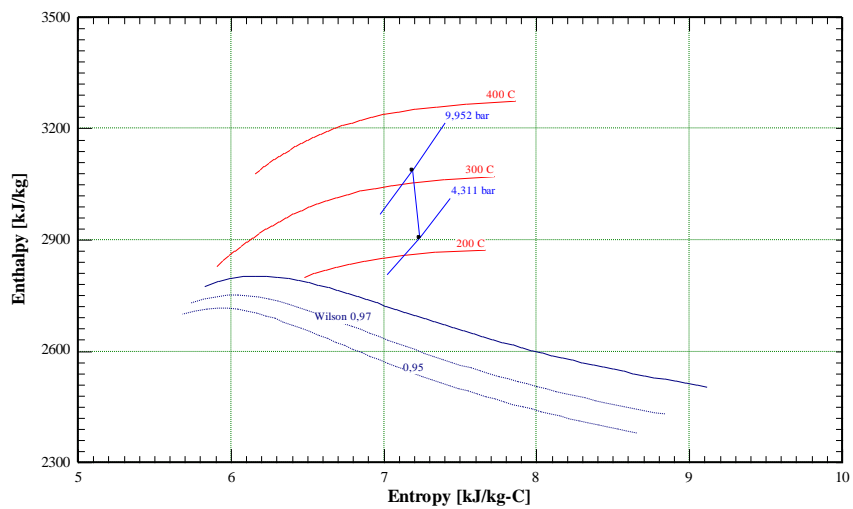


Figura 3.9 Diagrama H-S ST Group 4



Tabla 3.5: Variables ST Group 4

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [4]</b>		
Dry step efficiency	89,13	%
Group overall efficiency	89,76	%
Group blading efficiency	89,76	%
Expansion power	8467	kW
Shaft power	8446	kW
Mechanical loss	21,16	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	9,952	bar
Temperature	317	C
Massflow	46,51	kg/s
Enthalpy	3088,02	kJ/kg
Pressure after inlet loss	9,952	bar
<b>HP End Leakage</b>		
Leak in massflow	0,0398	kg/s
Leak in enthalpy	2717,84	kJ/kg
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	46,55	kg/s
Expansion line initial pressure	9,952	bar
Expansion line initial enthalpy	3087,71	kJ/kg
Expansion line end pressure	4,311	bar
Expansion line end enthalpy	2905,83	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	4,311	bar
Temperature	222,1	C
Massflow	46,55	kg/s
Enthalpy	2905,83	kJ/kg

ST Group 5

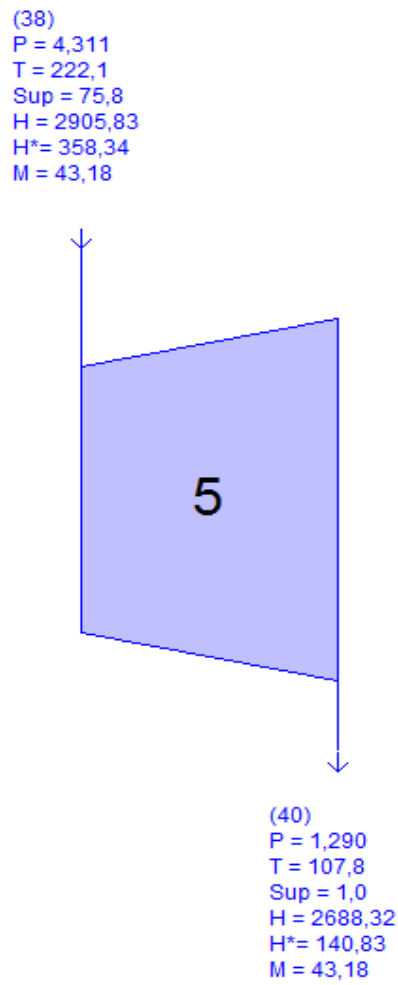


Figura 3.10: Esquema ST Group 5

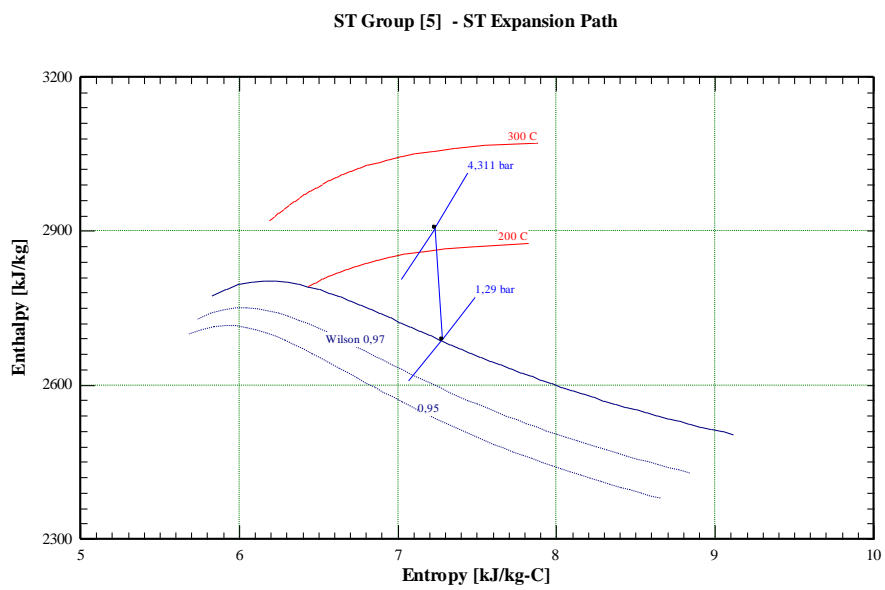


Figura 3.11 Diagrama H-S ST Group 5

Tabla 3.6: Variables ST Group 5

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [5]</b>		
Dry step efficiency	91,67	%
Group overall efficiency	92,34	%
Group blading efficiency	92,34	%
Expansion power	9391	kW
Shaft power	9368	kW
Mechanical loss	23,47	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	4,311	bar
Temperature	222,1	C
Massflow	43,18	kg/s
Enthalpy	2905,83	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	1,29	bar
Temperature	107,8	C
Massflow	43,18	kg/s
Enthalpy	2688,32	kJ/kg

ST Group 6

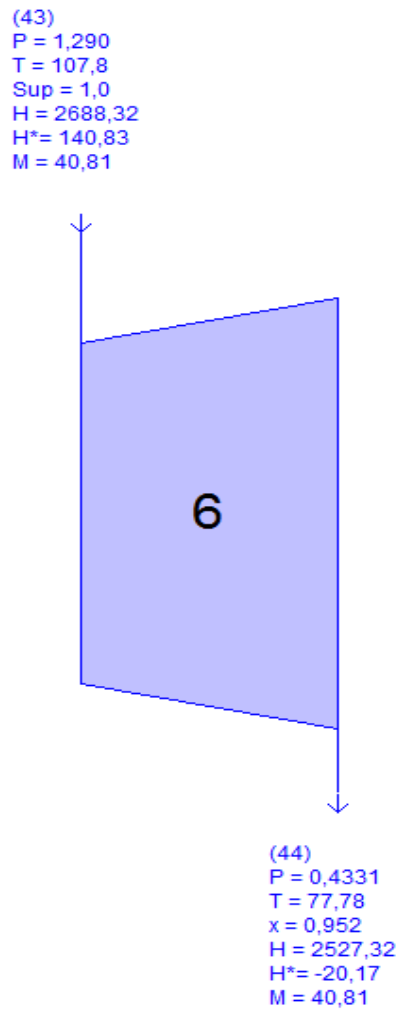


Figura 3.12: Esquema ST Group 6

ST Group [6] - ST Expansion Path

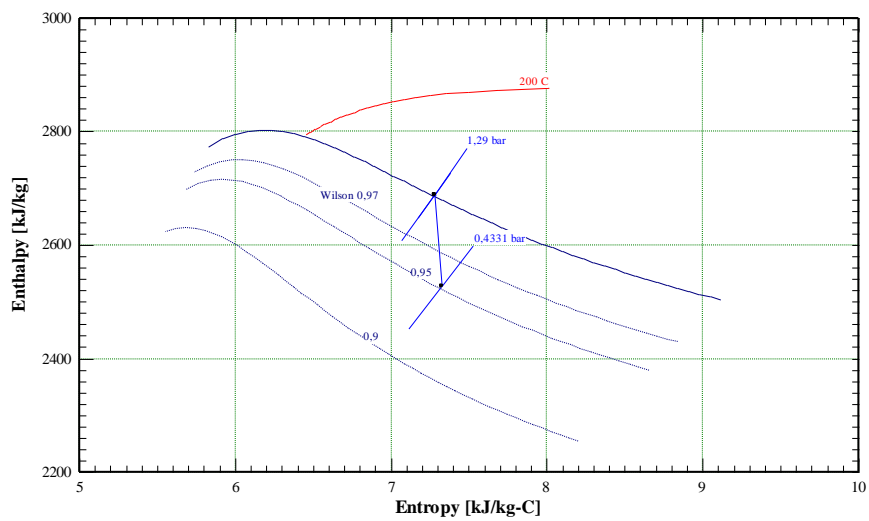


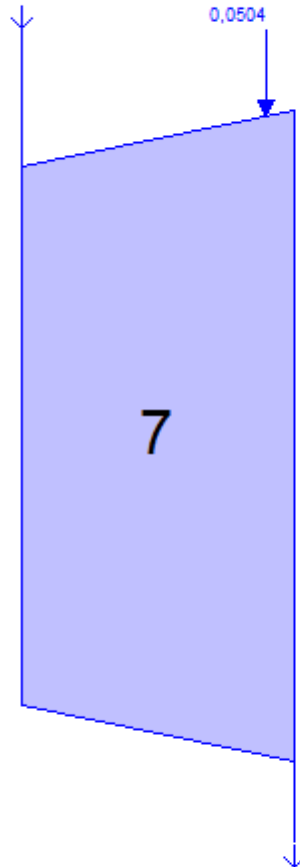
Figura 3.13 Diagrama H-S ST Group 6

Tabla 3.7: Variables ST Group 6

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [6]</b>		
Dry step efficiency	92,11	%
Group overall efficiency	91,22	%
Group blading efficiency	91,22	%
Expansion power	6571	kW
Shaft power	6555	kW
Mechanical loss	16,42	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	1,29	bar
Temperature	107,8	C
Massflow	40,81	kg/s
Enthalpy	2688,32	kJ/kg
Pressure after inlet loss	1,29	bar
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	40,81	kg/s
Expansion line initial pressure	1,29	bar
Expansion line initial enthalpy	2688,32	kJ/kg
Expansion line end pressure	0,4331	bar
Expansion line end enthalpy	2527,32	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	0,4331	bar
Temperature	77,78	C
Massflow	40,81	kg/s
Enthalpy	2527,32	kJ/kg
Steam quality	0,9516	

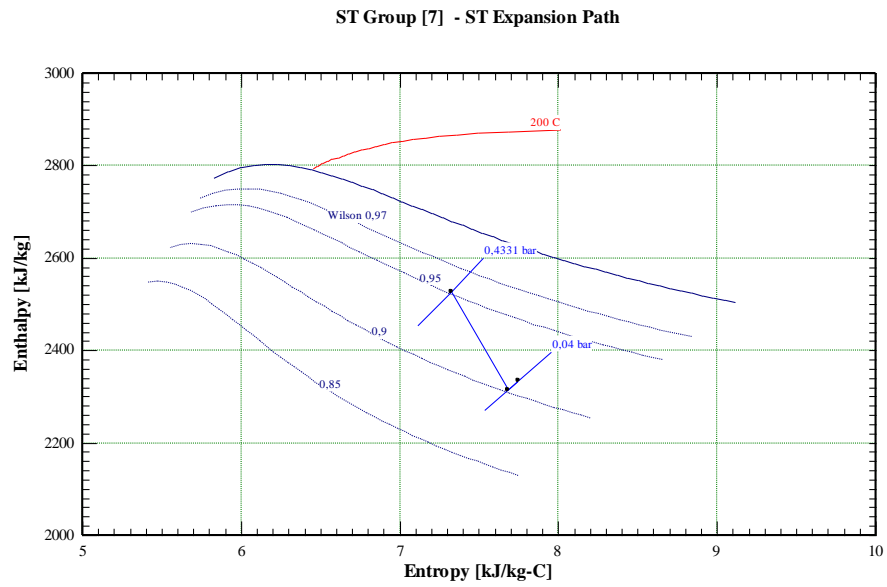
ST Group 7

(50)  
P = 0,4331  
T = 77,78  
x = 0,952  
H = 2527,32  
H\* = -20,17  
M = 38,21



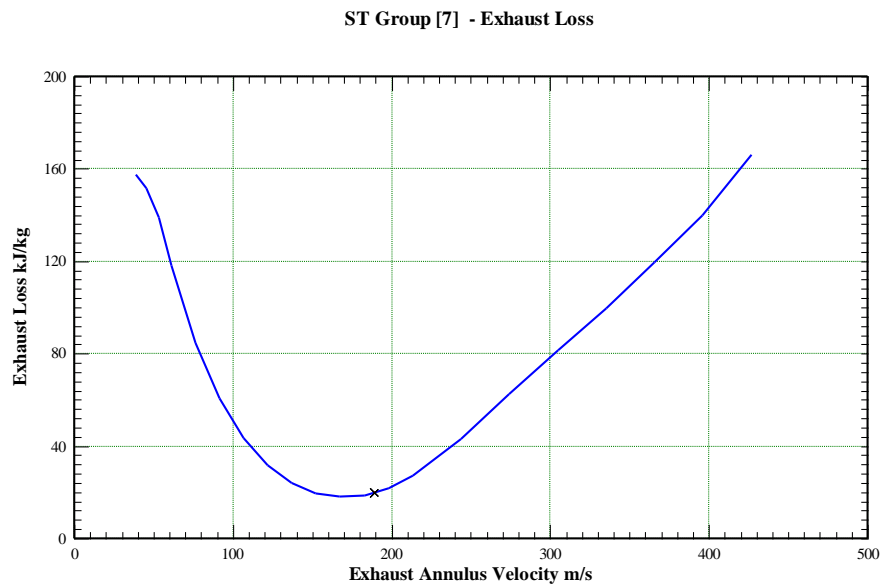
(51)  
P = 0,0400  
T = 28,97  
x = 0,910  
H = 2334,31  
H\* = -213,18  
M = 38,26

Figura 3.14: Esquema ST Group 7



~

Figura 3.15 Diagrama H-S ST Group 7



~

Figura 3.16: Diagrama pérdidas en el escape ST Group 7

Tabla 3.8: Variables ST Group 7

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>ST Group [7]</b>		
Dry step efficiency	70,65	%
Group overall efficiency	60,26	%
Group blading efficiency	66,4	%
Expansion power	7395	kW
Shaft power	7376	kW
Mechanical loss	18,48	kW
<b>Turbine Inlet</b>		
Type of inlet control	Sliding	
Pressure	0,4331	bar
Temperature	77,78	C
Massflow	38,21	kg/s
Enthalpy	2527,32	kJ/kg
<b>Expansion Line</b>		
Expansion massflow	38,21	kg/s
Expansion line initial pressure	0,4331	bar
Expansion line initial enthalpy	2527,32	kJ/kg
Expansion line end pressure	0,04	bar
Expansion line end enthalpy	2314,05	kJ/kg
<b>LP End Leakage</b>		
Leak in massflow	0,0504	kg/s
Leak in enthalpy	2743,73	kJ/kg
<b>Turbine Outlet</b>		
Pressure	0,04	bar
Temperature	28,97	C
Massflow	38,26	kg/s
Enthalpy	2334,31	kJ/kg
Steam quality	0,9098	
<b>Exhaust End</b>		
Exhaust loss	19,72	kJ/kg
Dry exhaust loss	19,72	kJ/kg
Annulus velocity (before Exhaust Loss)	189	m/s
Volumetric flow per end (before Exhaust Loss)	1197,5	m <sup>3</sup> /s
Number of ends	1	



Last stage rotor exit angle	64,24	degrees
Blade length	808,3	mm
Pitch diameter	2494,5	mm
Annulus area per end	6,334	m <sup>2</sup>

**- Pre calentadores (Feedwater heater):**

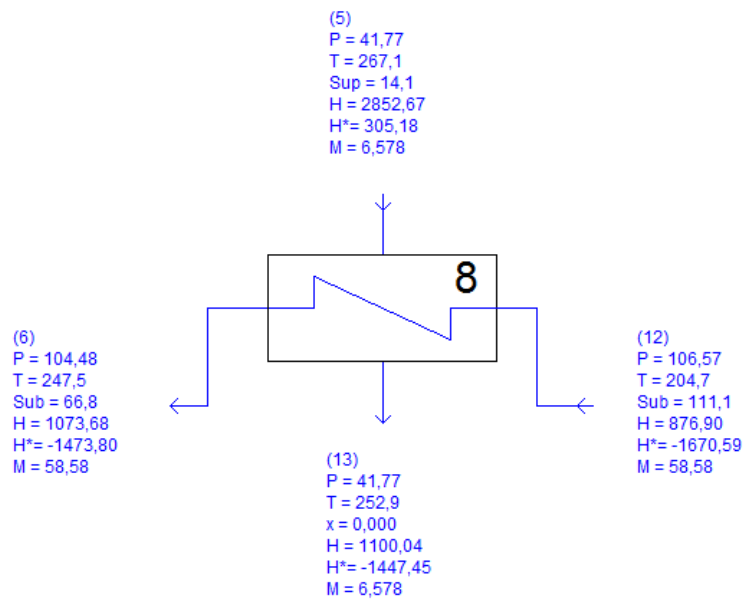
Componen los intercambiadores que precalientan el vapor antes de su entrada a los intercambiadores vapor/HTF, haciendo uso del vapor procedente de las extracciones de los cuerpos de turbinas. Para estos elementos no es necesario modificar los parámetros por defecto, ya que serán recalculados de acuerdo a las corrientes con prioridad. No obstante, ayudará el indicar una temperatura de salida del precalentador cercana a la de diseño al realizarse menos iteraciones.

Tabla 3.9: Parámetros de Pre calentadores

Feedwater heater	Exit T <sup>a</sup> at design point [°C]
8	247
9	205
10	140
11	101
12	71

Se adjuntan en las páginas siguientes los esquemas básicos de los precalentadores, un resumen de sus balances y sus correspondientes diagramas T-Q.

Feedwater Heater 8



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Feedwater Heater [8]  
 Mode: Off-design  
 FW temperature mode: Valve modulated to control FW exit temperature  
 Heat transfer = 11528 kW  
 UA of condensing section = 585,8 kW/C  
 Shell pressure = 41,77 bar, saturation temperature = 252,9 C  
 Terminal difference = 5,485 C

Figura 3.17: Esquema Precalentador 8

Feedwater Heater [8] - TQ Diagram

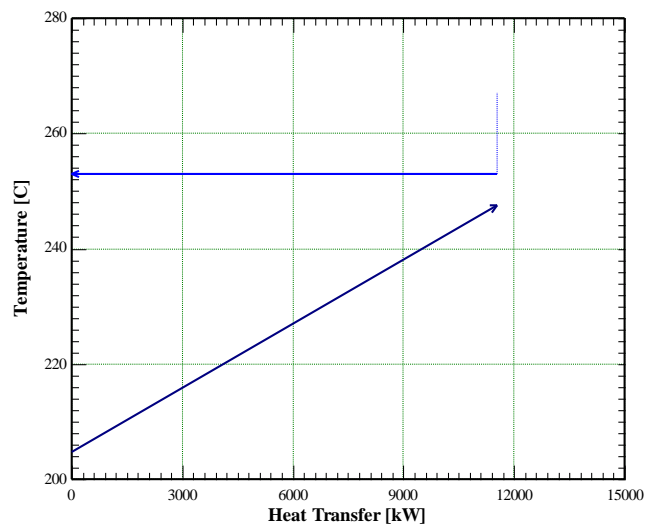
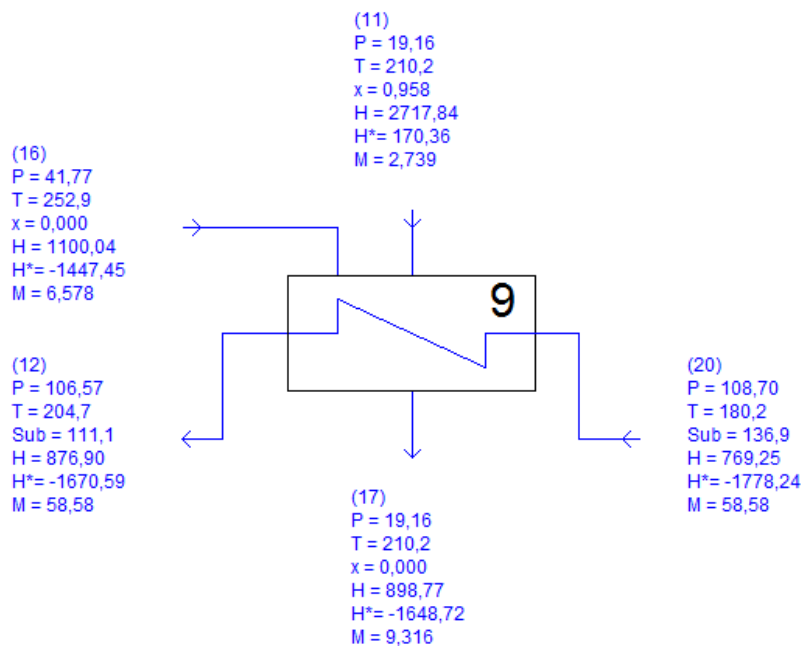


Figura 3.18: Diagrama T-Q Precalentador 8

Feedwater Heater 9



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Feedwater Heater [9]  
 Mode: Off-design  
 FW temperature mode: Valve modulated to control FW exit temperature  
 Heat transfer = 6306 kW  
 UA of condensing section = 434,6 kW/C  
 Shell pressure = 19,16 bar, saturation temperature = 210,2 C  
 Terminal difference = 5,575 C

Figura 3.19: Esquema Precalentador 9

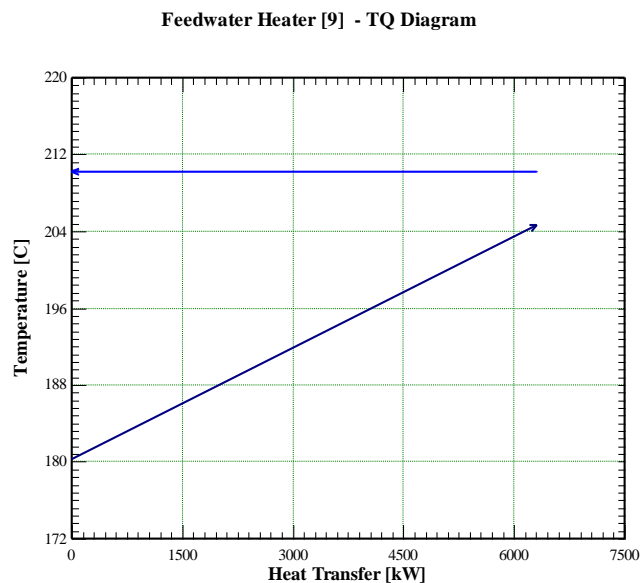
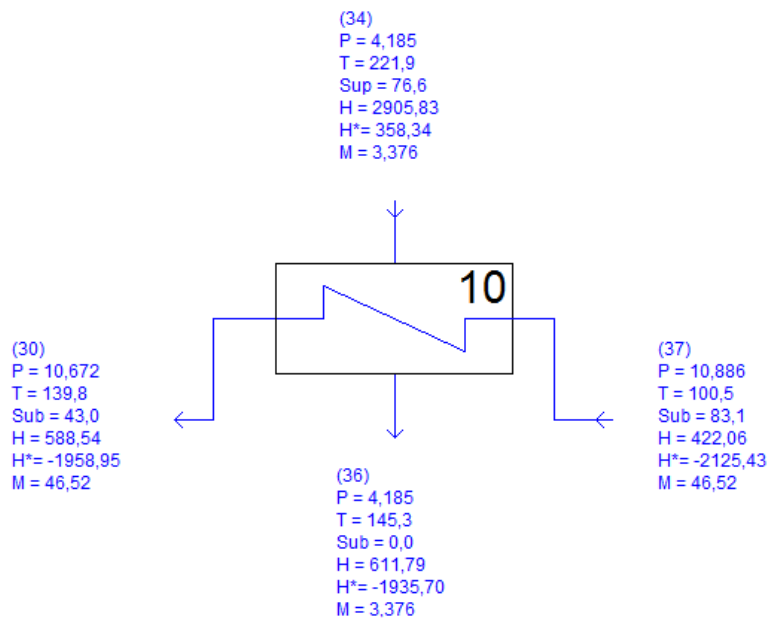


Figura 3.20: Diagrama T-Q Precalentador 9

Feedwater Heater 10



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Feedwater Heater [10]  
 Mode: Off-design  
 FW temperature mode: Valve modulated to control FW exit temperature  
 Heat transfer = 7745 kW  
 UA of condensing section = 413,9 kW/C  
 Shell pressure = 4,185 bar, saturation temperature = 145,3 C  
 Terminal difference = 5,496 C

Figura 3.21: Esquema Precalentador 10

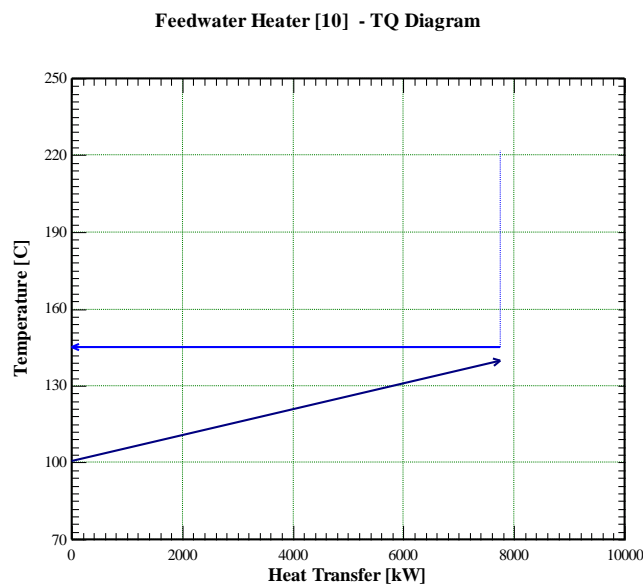
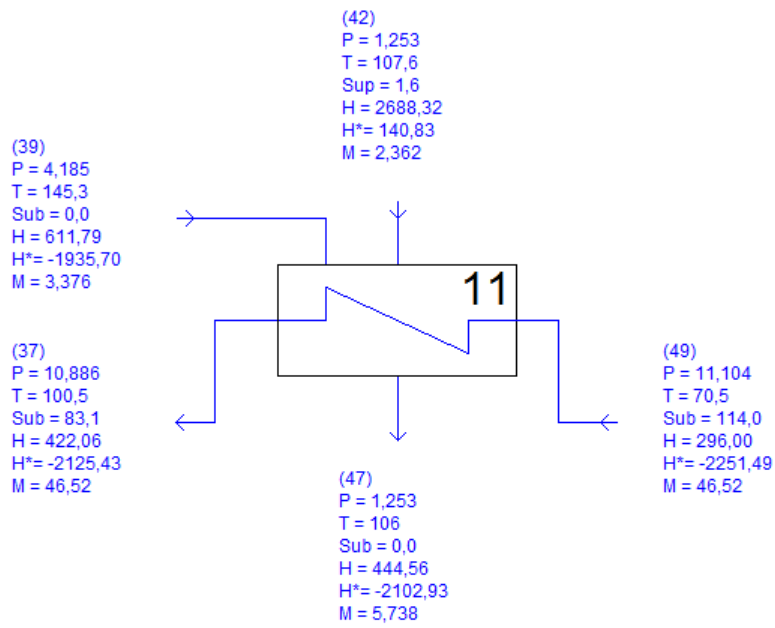


Figura 3.22: Diagrama T-Q Precalentador 10

Feedwater Heater 11



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Feedwater Heater [11]  
 Mode: Off-design  
 FW temperature mode: Valve modulated to control FW exit temperature  
 Heat transfer = 5864 kW  
 UA of condensing section = 364,3 kW/C  
 Shell pressure = 1,253 bar, saturation temperature = 106 C  
 Terminal difference = 5,501 C

Figura 3.23: Esquema Precalentador 11

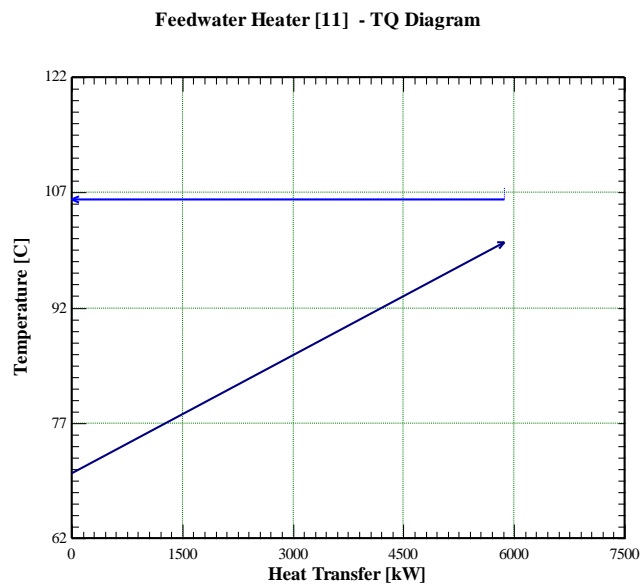
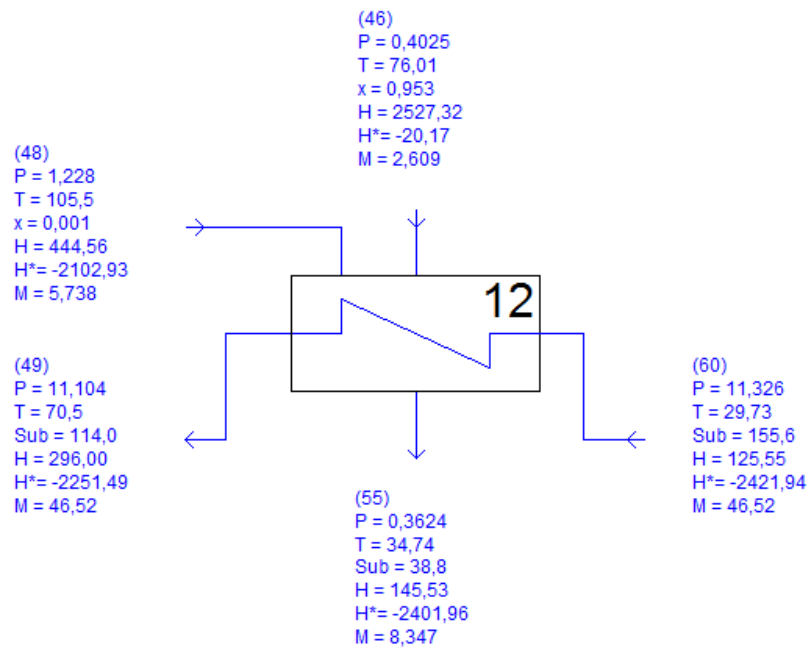


Figura 3.24: Diagrama T-Q Precalentador 11

Feedwater Heater 12



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
Feedwater Heater [12]  
Mode: Off-design  
FW temperature mode: Valve modulated to control FW exit temperature  
Heat transfer in condensing section = 6576 kW, in drain cooler = 1353,6 kW  
Total heat transfer = 7930 kW  
UA of condensing section = 487,6 kW/C, UA of drain cooler = 84,95 kW/C  
Shell pressure = 0,3624 bar, saturation temperature = 73,5 C  
Terminal difference = 3,001 C, drain cooler approach = 4,999 C

Figura 3.25: Esquema Precalentador 12

Feedwater Heater [12] - TQ Diagram

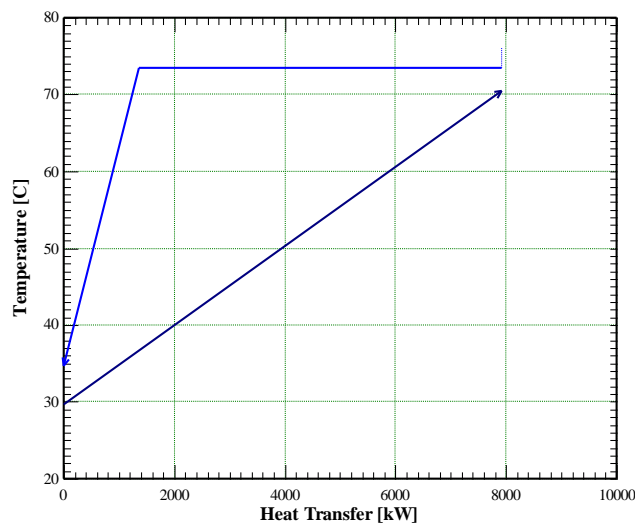


Figura 3.26: Diagrama T-Q Precalentador 12

**- Desaireador (Deareator):**

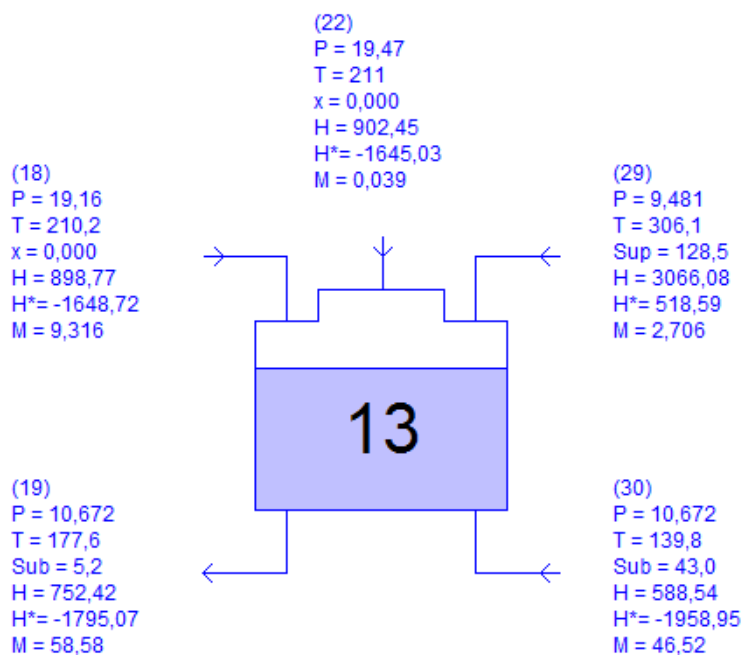
Este equipo se encarga de extraer el aire o cualquier tipo de gas que puede aparecer debido a filtraciones o que simplemente acompañan al agua de aporte disueltos.

Tabla 3.10: Parámetros Desaireador

Deaerator	DA pressure especificaion mode	Design pressure	Heating flow priority
13	Specified by user	9,476	Weak

Este elemento precisará una curva de ajuste propia para adecuar su funcionamiento cuando modelemos el régimen dinámico.

Se presenta su esquema, una tabla resumen con los balances y su diagrama T-Q.



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Deaerator [13]  
 Mode: Off-design  
 Deaerator type: tank car (TC)  
 Operating pressure = 9,476 bar, saturation temperature = 177,6 C  
 Additional water head at inlet = 12,19 m H2O = 1,196 bar  
 Additional water head at outlet = 12,19 m H2O = 1,196 bar  
 Feedwater storage = 27640 l  
 Overall length = 6,359 m, overall height = 5,653 m  
 Dry weight = 10353 kg, operating weight = 37401 kg, flooded weight = 51868 kg

Figura 3.27: Esquema Desaireador



Deaerator [13] - T-Q Diagram

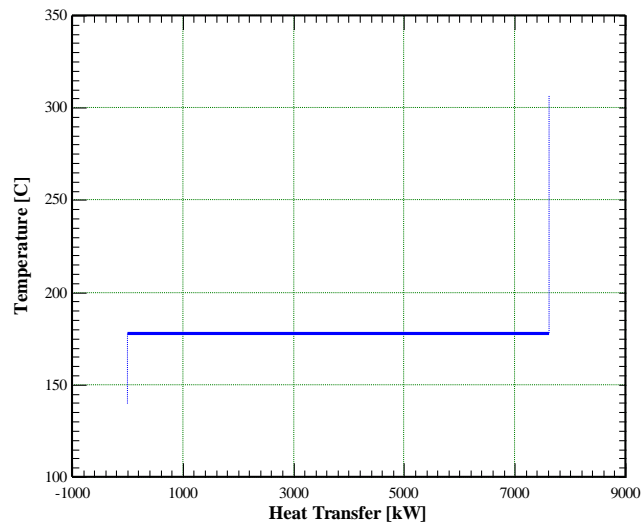


Figura 3.28: Diagrama T-Q Desaireador

Tabla 3.11: Variables Desaireador

Off-design Heat Balance Results		
<b>Deaerator [13]</b>		
Pressure	9,476	bar
Saturation temperature	177,6	C
Feedwater storage	27640	l
<b>Feedwater Inlet</b>		
Pressure	10,67	bar
Temperature	139,8	C
Enthalpy	588,5	kJ/kg
Mass flow	46,52	kg/s
Additional water head at inlet	12,19	m H2O
<b>Heating Stream</b>		
Pressure	9,481	bar
Temperature	306,1	C
Enthalpy	3066	kJ/kg
Mass flow	2,706	kg/s
<b>Pegging stream</b>		
Pressure	19,47	bar
Temperature	211	C
Enthalpy	902,5	kJ/kg
Mass flow	0	kg/s

<b>Flash in</b>		
Pressure	19,16	bar
Temperature	210,2	C
Enthalpy	898,8	kJ/kg
Mass flow	9,316	kg/s
<b>Feedwater Outlet</b>		
Pressure	10,67	bar
Temperature	177,6	C
Enthalpy	752,4	kJ/kg
Mass flow	58,58	kg/s
Additional water head at outlet	12,19	m H2O

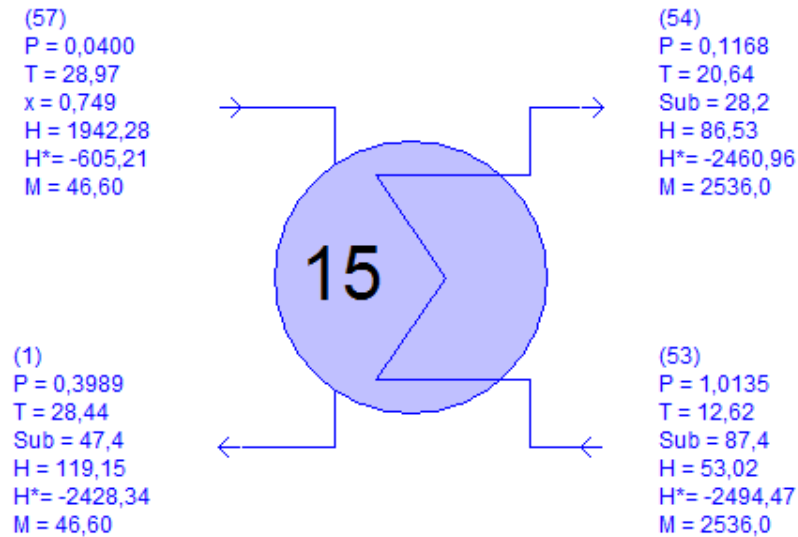
**- Condensador (Water-cooled condenser):**

Fija la presión de salida de la turbina en 0,04 bar. Precisa de una corriente de agua de refrigeración que será modelada posteriormente, aunque en el esquema ya se presentan sus balances.

Tabla 3.12: Parámetros Condensador

Water-cooled condenser	Design point pressure [bar]	Design point cooling water T <sup>a</sup> rise [°C]	Design point minimum pinch [°C]
15	0,04	8	2

Esquema y diagrama T-Q se exponen a continuación.



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Water-cooled Condenser [15]  
 Defined operating mode = Off-design, actual mode = Off-design  
 Condensing pressure = 0,04 bar, saturation temperature = 28,97 C  
 Heat rejection = 84964 kW, UA = 7140 kW/C  
 Cooling water pressure drop = 0,8967 bar  
 Water head to condensate outlet = 3,658 m H<sub>2</sub>O = 0,3589 bar

Figura 3.29: Esquema Condensador

Water-cooled Condenser [15] - TQ Diagram

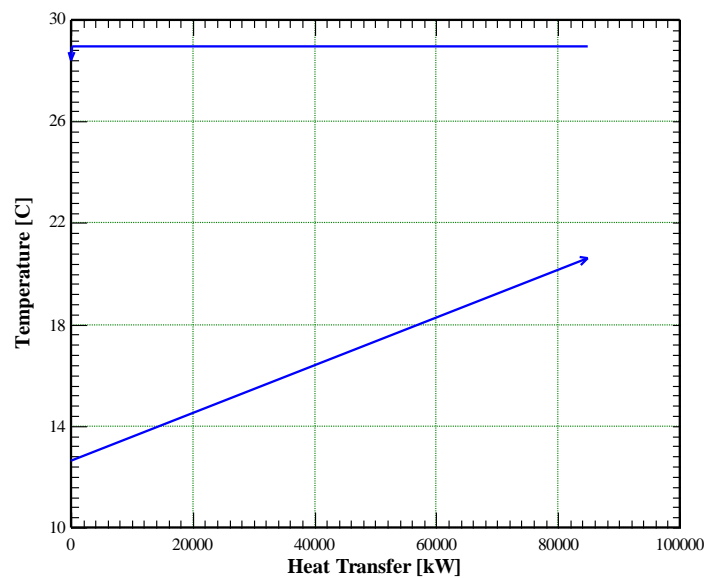


Figura 3.30: Diagrama T-Q Condensador

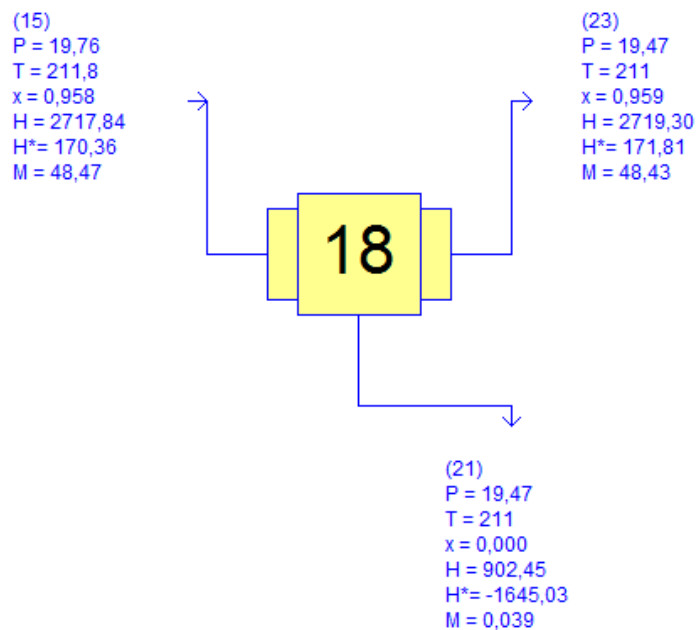
**- Separador de mezcla (Moisture Separator (Water)):**

Este elemento presenta ligeras diferencias en cuanto al funcionamiento respecto al suministrado por la empresa a cargo del proyecto. Una de las razones principales es que nuestro criterio de control de este modelo ha sido el de tomar como referencia el caudal de entrada en la turbina de baja. Los cálculos que realiza el software por tanto priorizan la corriente principal de este elemento que es predecesora inmediata de nuestra corriente de referencia (ver capítulo 2, página 11).

Tabla 3.13: Parámetros Separador de mezcla

Moisture Separator (Water)	Type of moisture separator	dP/P across the moisture separator	Liquid drain flow priority selection
18	Moisture removal only	0,015	Priority propagated from inlet or outlet

El esquema del elemento es el siguiente.



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Moisture Separator (Water) [18]  
 Actual moisture separator efficiency = 1,897 %

Figura 3.31: Esquema Separador de mezcla

**- Intercambiador de calor (General HX-S):**

En la planta real se encuentra tras la bomba a la salida del condensador. En nuestro modelo además aparece previo a estos dos elementos el ítem *makeup* (agua de maquillaje) que se define más adelante. Aunque los intercambiadores vapor-HTF se modelan con el mismo elemento, se presentarán en el siguiente apartado por claridad.

Tabla 3.14: Parámetros Intercambiador de calor vapor/vapor

General HX-S	HX S Specification	A outlet state (Temperature) [°C]	A outlet state (Quality)	Minimun pinch [°C]
16	Specify A outlet state	94,34	Subcooled	2,78

A continuación, se muestra el esquema, el diagrama T-Q y los datos del balance.

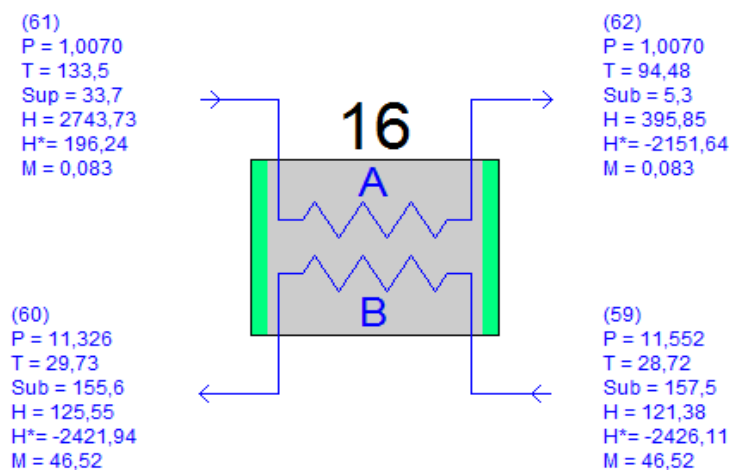


Figura 3.32: Esquema Intercambiador de calor vapor/vapor

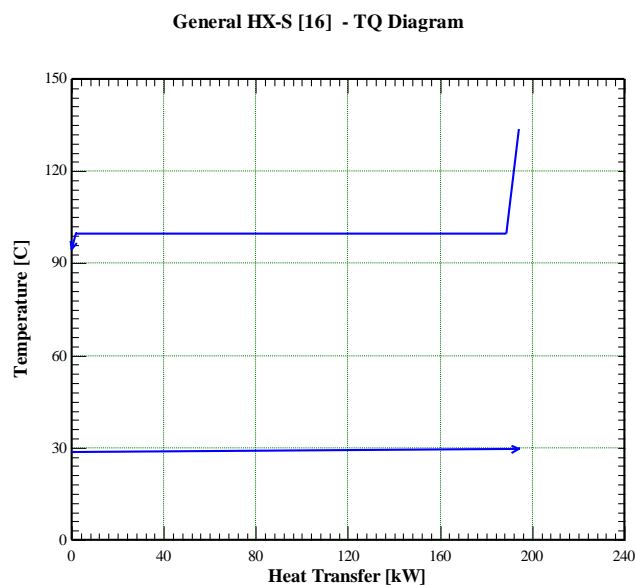


Figura 3.33: Diagrama T-Q Intercambiador de calor vapor/vapor

Tabla 3.15: Variables Intercambiador de calor vapor/vapor

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>General HX-S [16]</b>		
<b>A Path - Water</b>		
Molecular weight	18,02	
Inlet pressure	1,007	bar
Inlet temperature	133,5	C
Inlet flow	0,0827	kg/s
Inlet enthalpy	2743,7	kJ/kg
Exit pressure	1,007	bar
Exit temperature	-273,2	C
Exit enthalpy	395,8	kJ/kg
Pressure drop	0	bar
<b>B Path - Water</b>		
Molecular weight	18,02	
Inlet pressure	11,55	bar
Inlet temperature	28,72	C
Inlet flow	46,52	kg/s
Inlet enthalpy	121,4	kJ/kg
Exit pressure	11,33	bar
Exit temperature	-273,2	C
Exit enthalpy	125,5	kJ/kg
Pressure drop	0,2266	bar
<b>Performance</b>		
Heat transfer	194,2	kW
Heat loss	0	kW
Current UA	2,738	kW/C
Design point UA	2,738	kW/C
Pinch	65,76	C

**- Bombas (General Pump):**

Son las encargadas de mover el condensado/vapor por los conductos del ciclo. Se encuentran en la parte del tren de precalentadores, ya que en el tramo de la turbina el vapor avanza por simple diferencia de presión. Los datos de los que disponemos para ajustar nuestro modelo son insuficientes para realizar definiciones previas relevantes respecto a este elemento, con lo que permitiremos que el software calcule sus parámetros.

Tabla 3.16: Parámetros Bombas

General Pump	Pump type
14	Multistage centrifugal
17	Multistage centrifugal

Queremos incidir por tanto en que los resultados que se presentan para los elementos listados son la propuesta que el propio software realiza en función del resto de indicaciones dadas por el usuario. Si bien, sería sencillo establecer condiciones adicionales sobre las bombas.

No obstante, en cualquier caso, el empleo de un equipo de bombeo u otro no tendría un impacto en los resultados más allá del de afectar al consumo eléctrico de los mismos.

En las páginas siguientes se muestran el esquema básico de los elementos de bombeo, sus curvas características Altura-Caudal y datos de sus balances.

General Pump 14

(20)  
 P = 108,70  
 T = 180,2  
 Sub = 136,9  
 H = 769,25  
 H\* = -1778,24  
 M = 58,58



(19)  
 P = 10,672  
 T = 177,6  
 Sub = 5,2  
 H = 752,42  
 H\* = -1795,07  
 M = 58,58

P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 General Pump [14]  
 Mode: Off-design (Network determines flow)  
 Number of existing pumps per station = 1, Number operating = 1  
 Pump type: Multistage centrifugal  
 Pump driven by Integral motor:  
 Electricity consumption = 1053,9 kW, Hydraulic pumping power = 985,9 kW  
 Pump apparent isentropic efficiency = 65,47 %  
 Pressure rise (before control valve) = 111,9 bar, dP across valve = 13,87 bar, Overall pressure rise = 98,03 ba  
 Motor nameplate shaft power (each) = 1118,6 kW, 1118,6 kWe  
 Nameplate shaft speed = 3000 RPM (fixed RPM)  
 Recirculation ratio = 0, RR cooling load = 0 kW  
 Pump suction density = 889,7 kg/m<sup>3</sup>

Motor of General Pump [14]  
 There is 1 unit per station. Powers shown below are per unit.  
 Motor nameplate power = 1111,7 kW Nameplate efficiency = 96,52 %  
 Nameplate / Design point load = 1,035  
 Electricity consumption = 1053,9 kW Shaft power = 1016,9 kW(1363,7 hp)  
 Motor electrical loss = 37 kW  
 Motor efficiency = 96,49 %

Figura 3.34: Esquema Bomba 14

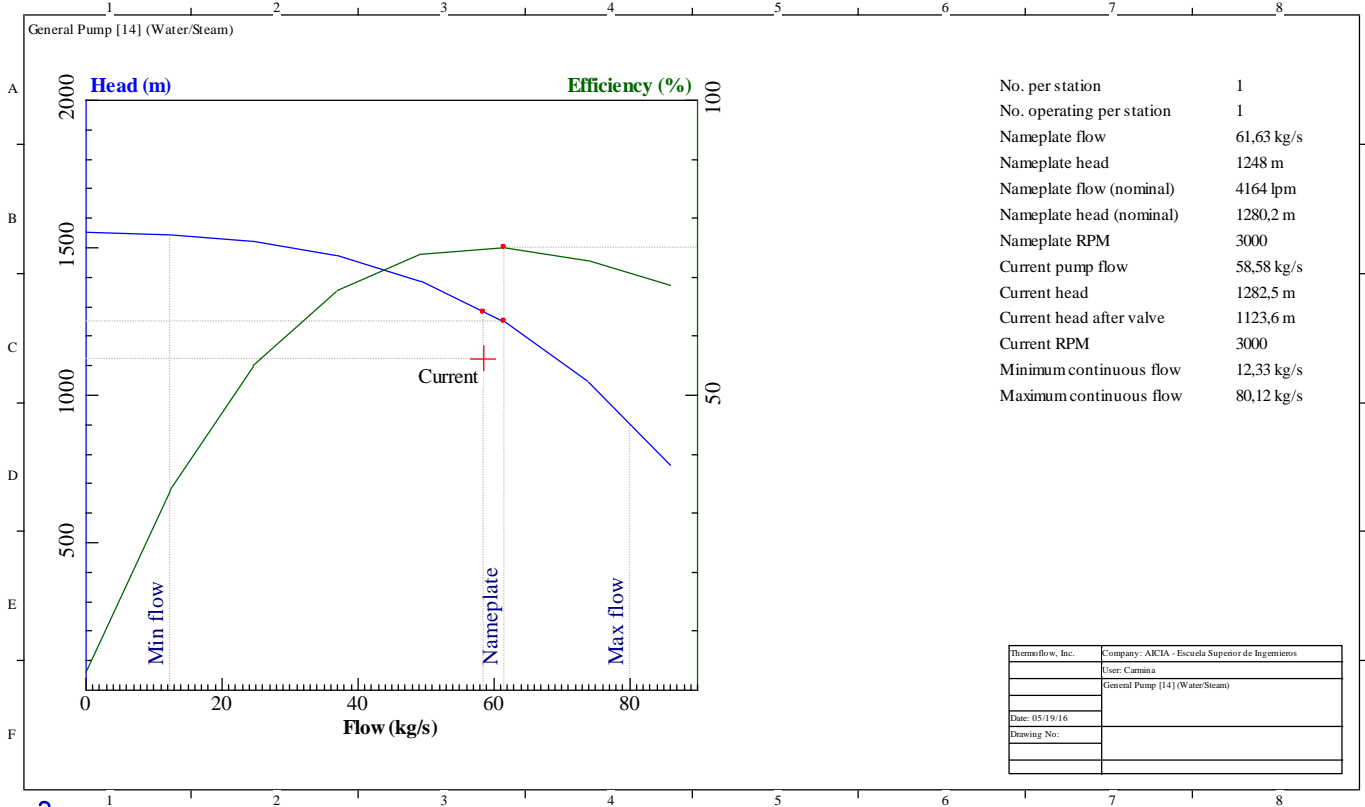


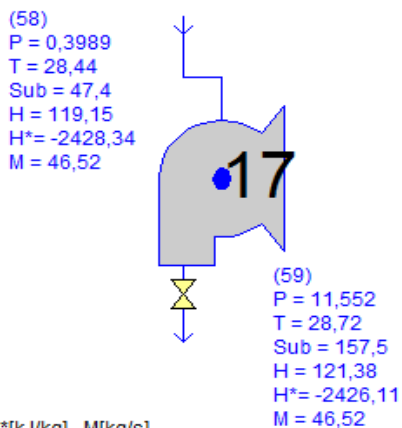
Figura 3.35: Curva Altura-Caudal Bomba 14



Tabla 3.17: Variables Bomba 14

<b>Off-design Heat Balance Results - Network determines flow</b>		
<b>General Pump [14]</b>		
Type	Fixed RPM	
Number per station	1	
Number operating	1	
<b>Suction Side (each)</b>		
Pressure	10,67	bar
Temperature	177,6	C
Mass flow	58,58	kg/s
Enthalpy	752,4	kJ/kg
Density	889,7	kg/m <sup>3</sup>
<b>Delivery Side (each)</b>		
Pressure	108,7	bar
Temperature	180,2	C
Mass flow	58,58	kg/s
Enthalpy	769,3	kJ/kg
<b>Performance Data (each)</b>		
Pump pressure rise	111,9 (1282,5)	bar (m)
Pressure rise after valve pressure drop	98,03 (1123,6)	bar (m)
Pump shaft speed	3000	RPM
Pump isentropic efficiency	74,73	%
Pump apparent isentropic efficiency	65,47	%
Pump hydraulic work	985,9	kW
Pump mechanical efficiency	96,95	%
Pump shaft work	1016,9	kW
Recirculation ratio	0	
Recirculation cooling load	0	kW
Motor efficiency	96,49	%
Electricity consumption	1053,9	kW

General Pump 17



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 General Pump [17]  
 Mode: Off-design (Network determines flow)  
 Number of existing pumps per station = 1, Number operating = 1  
 Pump type: Single stage centrifugal  
 Pump driven by Integral motor:  
 Electricity consumption = 112,9 kW, Hydraulic pumping power = 103,4 kW  
 Pump apparent isentropic efficiency = 50,36 %  
 Pressure rise (before control valve) = 18,29 bar, dP across valve = 7,141 bar, Overall pressure rise = 11,15 bar  
 Motor nameplate shaft power (each) = 130,5 kW, 130,5 kWe  
 Nameplate shaft speed = 3000 RPM (fixed RPM)  
 Recirculation ratio = 0 , RR cooling load = 0 kW  
 Pump suction density = 996,1 kg/m<sup>3</sup>

Motor of General Pump [17]  
 There is 1 unit per station. Powers shown below are per unit.  
 Motor nameplate power = 129,5 kW Nameplate efficiency = 94,85 %  
 Nameplate / Design point load = 1,021  
 Electricity consumption = 112,9 kW Shaft power = 107 kW(143,5 hp)  
 Motor electrical loss = 5,928 kW  
 Motor efficiency = 94,75 %

Figura 3.36: Esquema Bomba 17

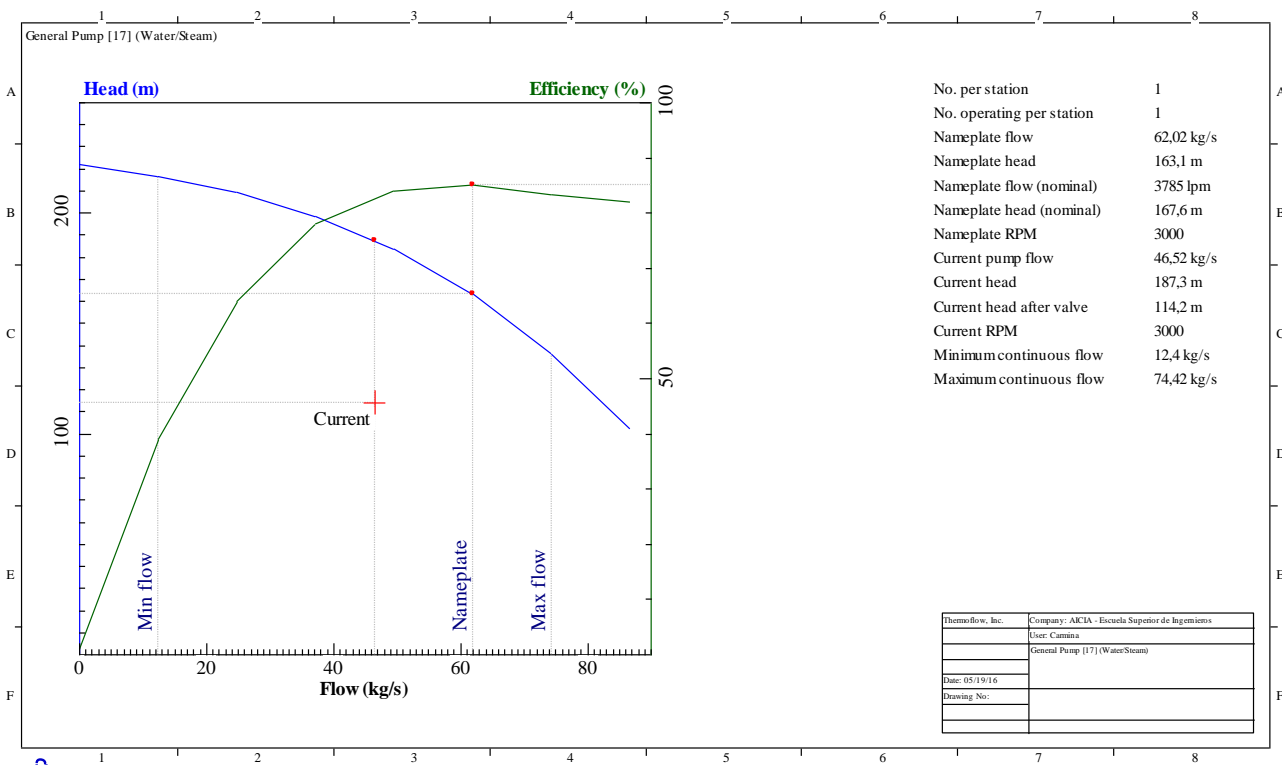


Figura 3.37: Curva Altura-Caudal Bomba 17

Tabla 3.18: Variables Bomba 17

<b>Off-design Heat Balance Results - Network determines flow</b>		
<b>General Pump [17]</b>		
Type	Fixed RPM	
Number per station	1	
Number operating	1	
<b>Suction Side (each)</b>		
Pressure	0,3989	bar
Temperature	28,44	C
Mass flow	46,52	kg/s
Enthalpy	119,2	kJ/kg
Density	996,1	kg/m <sup>3</sup>
<b>Delivery Side (each)</b>		
Pressure	11,55	bar
Temperature	28,72	C
Mass flow	46,52	kg/s
Enthalpy	121,4	kJ/kg
<b>Performance Data (each)</b>		
Pump pressure rise	18,29 (187,3)	bar (m)
Pressure rise after valve pressure drop	11,15 (114,2)	bar (m)
Pump shaft speed	3000	RPM
Pump isentropic efficiency	82,6	%
Pump apparent isentropic efficiency	50,36	%
Pump hydraulic work	103,4	kW
Pump mechanical efficiency	96,67	%
Pump shaft work	107	kW
Recirculation ratio	0	
Recirculation cooling load	0	kW
Motor efficiency	94,75	%
Electricity consumption	112,9	kW

**- Aportes de caudal de agua (Water source):**

Todos los aportes de caudal necesarios (exceptuando el agua de maquillaje, que se distingue por mantener estable la cantidad de agua/vapor circulando por el ciclo) son modelados mediante este ítem. Cabe destacar que en general tal elemento aparece simplemente por razones de modelado, y que en la realidad los aportes de agua pueden simbolizar desde redes de conductos más o menos complejas a simples conexiones a una red común de abastecimiento. Se indicará la función de cada uno, incluyendo el caso de la fuente de aporte vinculada al exceso de vapor en la turbina, y que aparece en nuestro esquema denominado como "STAssembly[1]:Water source[49] SSR excess steam". Al existir tal vinculación, no se definirán los parámetros de dicho caudal en el menú del elemento "Water Source", sino que vendrán fijados por la operación de la turbina.

Tabla 3.19: Parámetros Aportes de caudal de agua

Water source	Source phase	Mass flow [kg/s]	Pressure [bar]	Temperature [°C]	Flow priority	Link to ST assembly
26	Subcooled liquid	-	-	12,60	Very weak	No
49	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Yes (STAssembly[1])
51	Superheated vapor	0,1936	11,2	184,87	Strong	No

- El aporte de agua (Water source [26]) es la refrigeración del condensador. Es por ello que tan solo indicamos la temperatura del agua, y le damos prioridad muy baja.
- El ítem Water source [49] compone el vapor de sello de la turbina, que se emplea como un primer paso de precalentamiento. Reiteramos que al proceder directamente de la turbina, sus parámetros son impuestos por la operación de ésta.
- El elemento Water source [51] modela la purga del generador de vapor, la cual se mantiene constante, por lo que definimos todos sus parámetros.

Water source 26

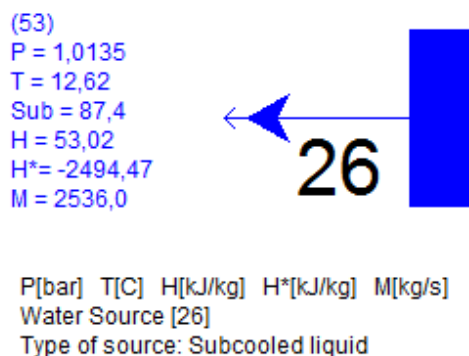


Figura 3.38: Esquema aporte de agua 26

Water source 49 (STAssembly[1])

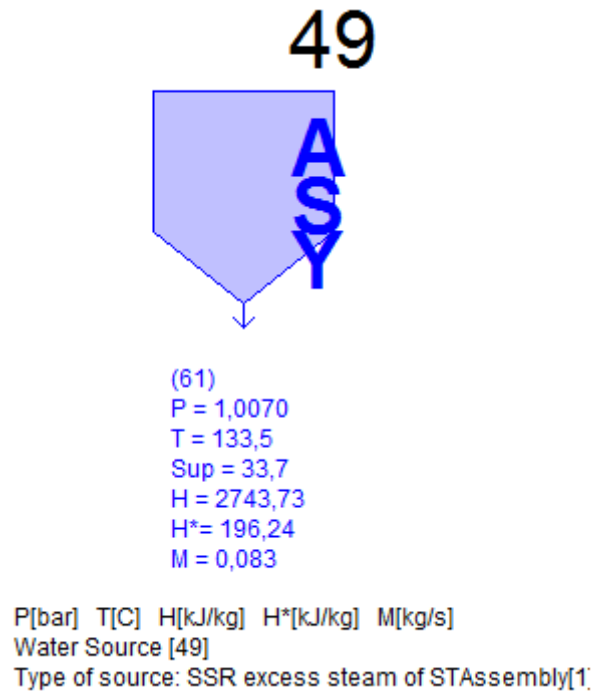


Figura 3.39: Esquema Aporte de agua 49 (modelo de vapor de sello)

Water source 51

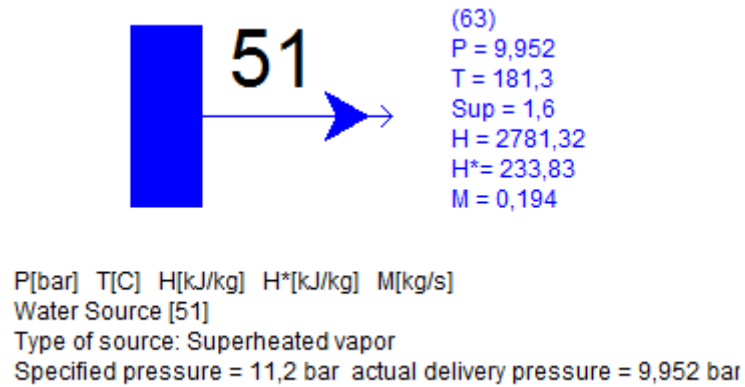


Figura 3.40: Esquema aporte de agua 51

**- Sumideros de caudal (Water sink):**

Similarmente al caso de los aportes, este elemento simplemente modela la salida de un cierto caudal del ciclo. No obstante, esto no significa que dicho caudal se deseche, sino que simplemente, a partir de dicho ítem, deja de tener relevancia en nuestro sistema. Es posible definir la presión del agua en este elemento, pero para nuestro caso no es relevante y el programa la ajustará en sus cálculos.

Tabla 3.20: Parámetros Sumideros de caudal

Water sink	Link to ST assembly
25	No
50	No

Water sink 25

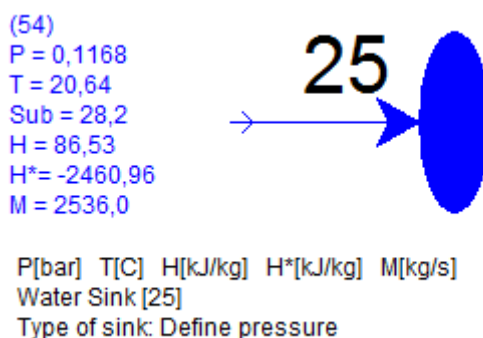


Figura 3.41: Sumidero de caudal 25

Water sink 50

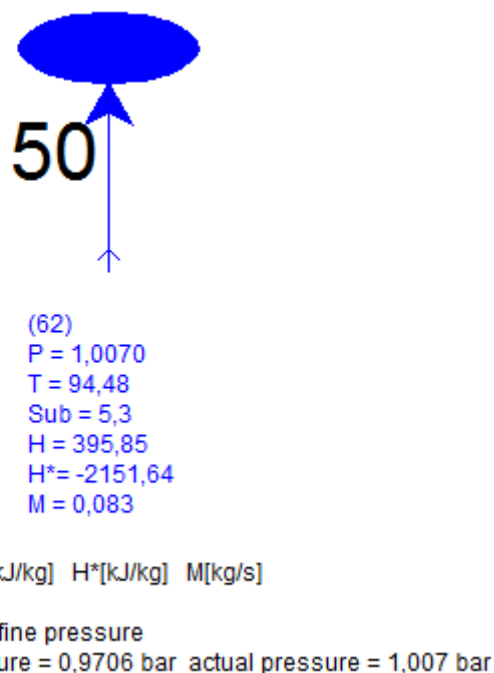


Figura 3.42: Sumidero de caudal 50

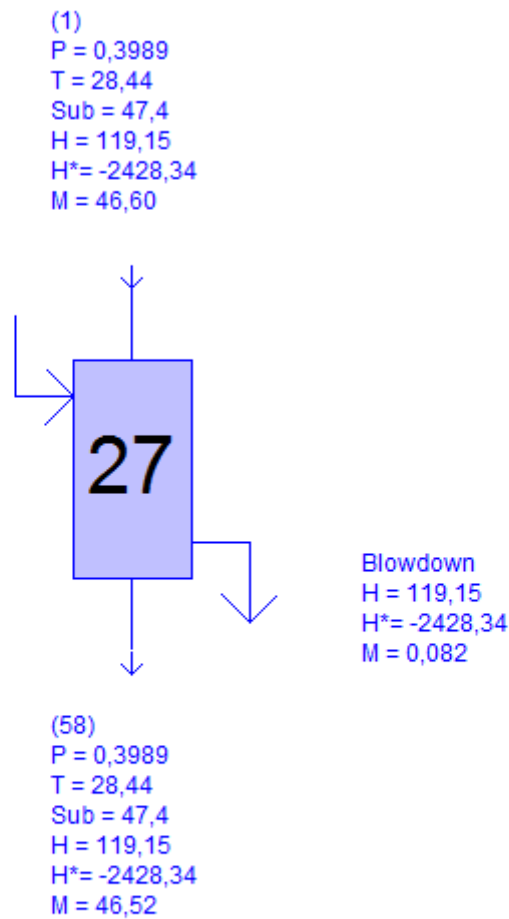
**- Agua de maquillaje (Makeup / Blowdown):**

Este elemento como se ha comentado anteriormente se encarga de mantener estable el caudal de agua/vapor en el ciclo. Con ello se previenen las pérdidas ocasionadas por posibles filtraciones o escapes de vapor controlados o no. Se coloca a la salida del condensador, ya que de ese modo trabaja en fase líquida.

Tabla 3.21: Parámetros Agua de maquillaje

Makeup / Blowdown	Makeup phase	Makeup temperature [°C]
27	Subcooled liquid	12,6

Su esquema es el siguiente.



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Makeup / Blowdown [27]  
 Blowdown flow = 0,0822 kg/s, Temperature = 28,44 C, Enthalpy = 119,2 kJ/kg

Figura 3.43: Esquema Agua de maquillaje

**- Válvulas (Valve):**

El modelado de válvulas puede omitirse en algunos casos, si bien, aunque en nuestro esquema solo era absolutamente necesario modelar la primera válvula del tren de precalentamiento (Valve[32]), se ha optado por definir las 5 por precisión, respecto al esquema suministrado por el equipo del proyecto, y claridad. Téngase en cuenta que en todo momento, tratamos de adaptarnos al esquema de funcionamiento provisto, con lo que las pérdidas de presión en las válvulas ha sido ajustadas para conseguir los parámetros indicados en cada corriente de forma práctica. Es por ello, que sobre algunas se define una pérdida de carga nula, ya que, en tales casos, es el propio ítem del recalentador el que regula dicha presión.

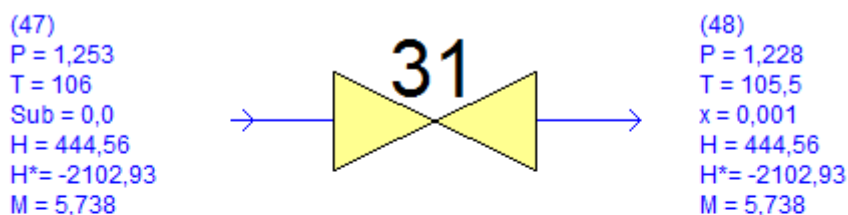
Tabla 3.22: Parámetros Válvulas

Valve	Valve Function	dP/P @VWO* [%]	Downstream set point [bar]
28	Wide open	0	-
29	Wide open	0	-
30	Wide open	0	-
31	Wide open	2	-
32	Downstream set point pressure	0	0,04

\* @VWO: Referido a Valve Wide Open (Válvula Completamente Abierta)

Los esquemas de las válvulas 28, 29 y 30 no aportan información relevante, ya que no modifican los parámetros de las corrientes que pasan por ellas. Por este motivo se omite presentar su esquema. Los correspondientes a las válvulas 31 y 32 sí se muestran a continuación.

Valve 31

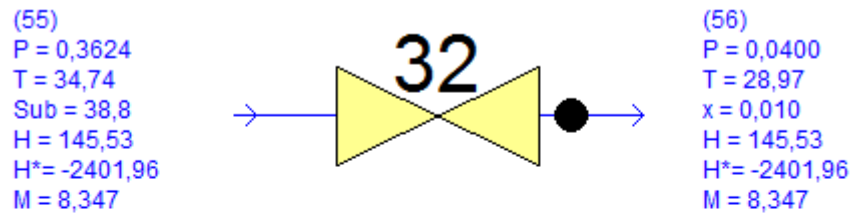


P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
 Valve [31]  
 Mode: Off-design  
 Valve Function: Valve wide open  
 Valve current status: Wide open  
 Pressure drop for wide open valve = 0,0246 bar  
 Pressure drop = 0,0246 bar

Figura 3.44: Esquema Válvula 31



Valve 32



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H\*[kJ/kg] M[kg/s]  
Valve [32]  
Mode: Off-design  
Valve Function: Downstream set point set point = 0,04 bar  
Actual network set downstream pressure = 0,04 bar  
Valve current status: Partially open  
Pressure drop for wide open valve = 0 bar  
Pressure drop = 0,3224 bar

Figura 3.45: Esquema Válvula 32

**- Divisores y mezcladores de corrientes (Splitter/Mixer):**

Estos elementos modelan cualquier división o mezcla de caudal. Se usan entre otras funciones para representar las extracciones entre los diferentes cuerpos de turbina. Aunque en la realidad tal proceso diste mucho de una simple bifurcación de tuberías, la posibilidad de definir pérdidas de carga asociadas a tal separación los convierte en unos elementos muy versátiles. Por supuesto, ya que la prioridad del flujo se establece como "débil", la *fracción deseada* por cada nodo es simplemente una indicación aproximada y serán en general recalculadas. No obstante, definir las implica la realización de un menor número de iteraciones.

Tabla 3.23: Parámetros Divisores y Mezcladores de corrientes

SP/MX	Tipo	Desired flow fraction of 1st clockwise node	Desired flow fraction into 1st clockwise node	Flow fractions priority
19	Splitter	0,9	-	Weak
20	Splitter	0,94	-	Weak
21	Splitter	0,9455	-	Weak
22	Splitter	0,9	-	Weak
23	Splitter	0,94	-	Weak
24	Splitter	0,93	-	Weak
48	Mixer	-	0,5 (default value)	Weak
52	Mixer	-	0,5 (default value)	Weak

No obstante, en la realización de este proyecto se ha optado por usar un modelo ideal de estos elementos e implementar las pérdidas de carga asociándolas a los elementos "Tubería" (Pipe).

Por ello, simplemente se presentan a modo ilustrativo los esquemas correspondientes a los dos tipos (Mixer y Splitter). La información relativa a las corrientes que los atraviesan en cada caso queda definida en la sección "Corrientes (Streams)" de este mismo capítulo.

Modelo Splitter (19) y Mixer (48)

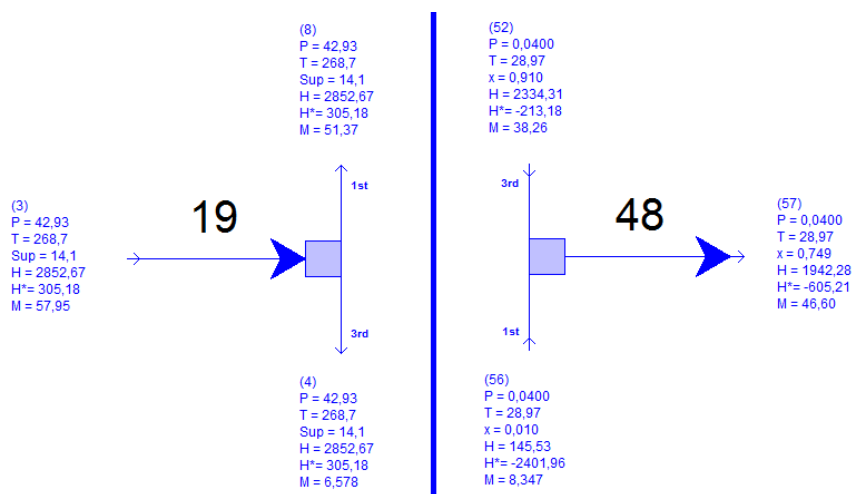


Figura 3.46: Esquemas Divisor (19) y Mezclador (18) de corriente

**- Tuberías (Pipe):**

Este elemento se encarga de modelar tramos de conductos, en los que se definen pérdidas de carga o pérdidas térmicas importantes. En algunos sectores del modelo se omite cuantificar las pérdidas mediante el ítem debido a que otro elemento se encarga de modelar tales pérdidas, como por ejemplo la valvulería del tren de precalentamiento definida anteriormente. En general, tampoco se van a incluir pérdidas térmicas, ya que no tenemos información precisa sobre ellas. En cualquier caso, éstas son prácticamente despreciables.

Tabla 3.24: Parámetros Tuberías

Pipe	Pipe heat loss [kJ/kg]	dP/P across pipe
35	0	0,024
36	0	0,028
37	0	0,03
38	0	0
39	0	0
40	0	0,01
41	0	0,05
42	0	0,05
43	0	0,03
44	0	0,03
45	0	0,076
46	0	0
47	0	0

Similarmente a los elementos Mixer/Splitter, los ítems "Pipe" se presentarán con un esquema tipo, y sus entradas y salidas son definidas en la sección "Corrientes (Streams)".

Modelo Pipe (38)

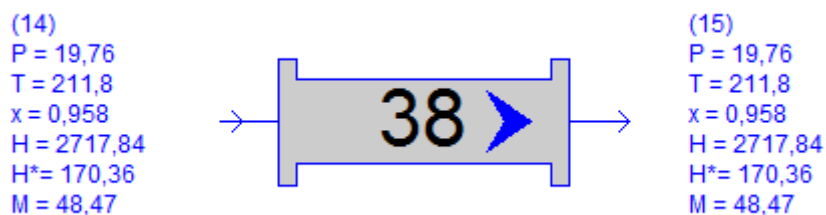


Figura 3.47: Esquema Tubería 38

Estos serían todos los elementos que forman parte del ciclo de vapor. Se presenta a continuación el esquema de nuestro modelo creado en Thermoflex *figura 3.2*. Las corrientes 7, 24, 25 y 35 son las entradas y salidas (respectivamente 2 a 2) a los intercambiadores vapor/HTF.

El icono anaranjado sobre el ST Group 1 representa que todos los grupos señalados con un punto naranja forman parte del mismo bloque (ST Assembly 1). Por su parte, el icono G1 conectado al último cuerpo de turbina (ST Group 7) nos indica la potencia bruta que desarrolla nuestro ciclo (54.767 MW).

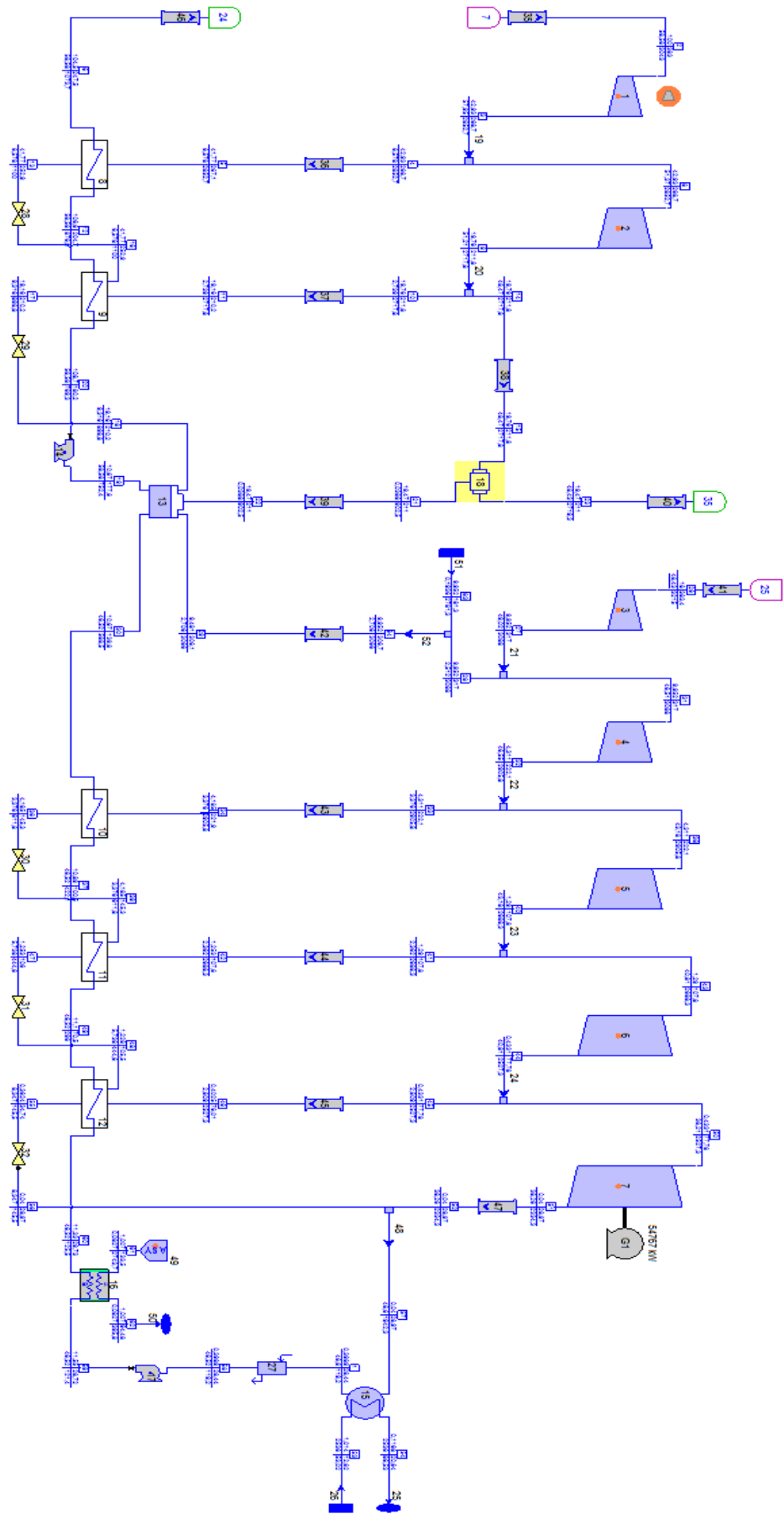


Figura 3.48: Ciclo de vapor completo

### **3.2 Modelo del ciclo de HTF**

De igual modo que con el ciclo de vapor, se definirán los elementos del ciclo del HTF. En esta sección se incluyen los intercambiadores vapor/HTF de los que el ciclo de vapor obtiene la energía que hace funcionar la turbina. Se ha de remarcar que se ha obviado la parte relativa a las calderas auxiliares de aceite térmico, ya que puesto que el objetivo de nuestro proyecto ha sido en todo momento el de simular el funcionamiento dinámico de esta planta en un año tipo. Las calderas simplemente representan una protección frente a la congelación del HTF y no influyen de forma directa en el funcionamiento del ciclo.

Es preciso mencionar una vez más que el diseño del campo solar atiende a una decisión tomada en el transcurso del modelado, y que no coincide en todos los casos con lo especificado en la memoria descriptiva (ver capítulo 1). Si bien, como se comprobará posteriormente, de plantearse un modelo de "caja negra", nuestro modelo funciona de forma similar al esquema suministrado por el equipo del proyecto en el punto de diseño establecido.

#### **Equipos y elementos auxiliares del ciclo de HTF:**

##### **- Campo solar con almacenamiento (Solar field w/ Storage):**

Este elemento es el más complejo de todo el modelo, ya que simula el comportamiento de varios equipos con distintas funciones. Las decisiones a las que hacíamos mención en el apartado 1.4 (Modificaciones en el proceso de modelado) son relativas a este ítem. Si bien, aunque es posible definir una gran cantidad de parámetros, no es sencillo acomodar el funcionamiento a un esquema previsto. Adelantamos que no ha sido posible satisfacer todas las condiciones redactadas en la memoria descriptiva. De modo que nuestro objetivo será aproximarnos todo lo posible a las condiciones de trabajo establecidas por el equipo del proyecto, y en menor medida, adaptarnos a la física de los equipos reales, tales como pueden ser el número de lazos o las medidas de los mismos.

Los parámetros predefinidos por el usuario se presentan en esta ocasión en formato de lista, y no en formato de tabla como se ha hecho en el resto del documento.

##### **Solar field w/ Storage [66]:**

· ED Main Inputs

- Desired mass flow: 620 kg/s

- Desired solar multiple: 2

- Desired exit temperature: 393 °C

- Flow priority: Strong

- Irradiance\*
  
- Irradiance Specification: User-defined at aperture
  
- Aperture Normal Direct Irradiance: 850 W/m<sup>2</sup>
  
- Collector Design
  
- Reflector aperture width: 5,77 m
  
- Reflector focal length: 1,71 m
  
- Number reflector row per flow path: 2
  
- Number reflector row banks: 12
  
- Flow path hardware
  
- Flow path hardware design: Automatic
  
- Storage
  
- Hours of storage: 9,3 h
  
- Cold tank temperature - Network return temperature: 1 °C
  
- Field exit temperature - Hot tank temperature: 13 °C

Se exponen a continuación el esquema del ítem, todos los datos de balances y características de los equipos modelados por el elemento y un diagrama del funcionamiento del sistema de almacenamiento. Se omiten no obstante los esquemas de la distribución del campo y los de la morfología de los captadores, ya que, aunque funcionan de forma equivalente a los del diseño real, no son fieles en cuanto al resto de características. No obstante, si adjuntamos una tabla informativa con los valores de los parámetros con los que trabaja el programa.

Modelo

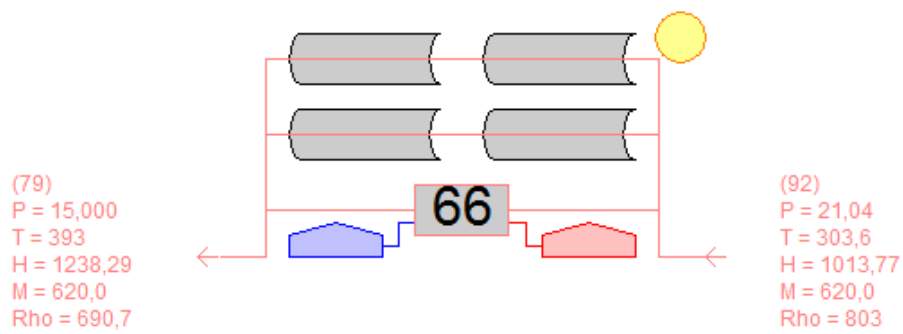


Figura 3.49: Esquema Campo solar

Tabla 3.25: Variables Campo solar

Off-design Heat Balance Results		
<b>Solar Field w/ Storage [66]</b>		
Heat transfer fluid type	DOWTHERM A LIQUID	
HTF concentration	100	%
<b>1. Irradiance</b>		
Irradiance specification: User-defined aperture irradiance		
Aperture normal direct irradiance	850	W/m <sup>2</sup>
<b>2. Heat Balance</b>		
Heat transfer to network	139203	kW
Percent of heat supplied by field	100	%
Percent of heat supplied by storage	0	%
Network inlet:		
Mass flow	620	kg/s
Pressure	21,04	bar
Temperature	303,6	C
Enthalpy	1013,8	kJ/kg
Network exit:		
Mass flow	620	kg/s
Pressure	15	bar
Temperature	393	C
Enthalpy	1238,3	kJ/kg
Inlet Header:		
Mass flow	1255,8	kg/s
Pressure	21,04	bar



Temperature	304,9	C
Enthalpy	1016,8	kJ/kg
Heat loss in header	2190,6	kW
Collector Inlet:		
Mass flow	1255,8	kg/s
Pressure	19,45	bar
Temperature	304,1	C
Enthalpy	1015	kJ/kg
Inlet tube velocity	2,206	m/s
Collector Exit:		
Mass flow	1255,8	kg/s
Pressure	16,59	bar
Temperature	394,3	C
Enthalpy	1241,8	kJ/kg
Tube velocity at collector exit	2,57	m/s
Exit Header:		
Mass flow	1255,8	kg/s
Pressure	15	bar
Temperature	393	C
Enthalpy	1238,3	kJ/kg
Heat loss in header	4381	kW
Storage HX Inlet - Field side:		
Mass flow	635,8	kg/s
Pressure	24,21	bar
Temperature	393,7	C
Enthalpy	1240,1	kJ/kg
Storage HX Exit - Field side:		
Mass flow	635,8	kg/s
Pressure	21,04	bar
Temperature	306,1	C
Enthalpy	1019,7	kJ/kg
Storage HX Inlet - Storage side:		
Mass flow	1224,9	kg/s
Pressure	6,728	bar
Temperature	304,8	C

Enthalpy	861,7	kJ/kg
Storage HX Exit - Storage side:		
Mass flow	1224,9	kg/s
Pressure	2,542	bar
Temperature	380	C
Enthalpy	975	kJ/kg
Inlet header pressure drop	1,594	bar
Collector flowpath pressure drop	2,857	bar
Exit header pressure drop	1,591	bar
Storage HX pressure drop (field-side)	3,167	bar
<b>3. Summary</b>		
Number of operating flow paths	216	
Number of existing flow paths	216	
Mass flow per operating flow path	5,814	kg/s
Mass flux	1770,1	kg/m <sup>2</sup> -s
Solar energy impinging focused active aperture in each operating flow path	2027,9	kW
Percentage of active aperture in operating flowpaths defocused to control flow or exit state	0	%
Solar energy absorbed by receiver in each operating flow path	1444,9	kW
Energy loss from receiver in each operating flow path	126,5	kW
Net heat absorbed by fluid in each operating flow path	1318,3	kW
Heat loss from inlet and exit headers per operating flow path	30,43	kW
Net heat absorbed by field	278187	kW
Collector [excl. headers] efficiency (Fluid heating in receiver / Energy impinging focused active collector)	65,01	%
Field [incl. headers] efficiency (Fluid heating in field / Energy impinging focused active collector)	63,51	%
Area [incl. headers] efficiency (Fluid heating in field / DNI impinging installed area)	21,41	%

Tabla 3.26: Variables Campo solar (sistema de almacenamiento)

<b>Off-design Results</b>		
<b>Solar Field w/ Storage [66]</b>		
<b>1. Storage System</b>		
Operating mode	Charging	
Stored fluid	Nitrate Salt 60% NaNO3 40% KNO3 by wt	
Nominal capacity	1423,8	MW/hr
Number of hours of storage	9,3	hours
Nominal tank-side fluid flowrate	1361,3	kg/s
Hot tank temperature	380	C
Cold tank temperature	304,6	C
Mass of stored fluid	45577	tonne
Volume of each storage tank	24679	m <sup>3</sup>
Starting hot tank level	50	%
Ending hot tank level	59,68	%
Time period this run represents	1	hours
Storage heat exchanger heat transfer rate	138727	kW
Storage heat exchanger UA	26969	kW/C
Storage heat exchanger LMTD	5,195	C
Field-side flowrate through storage HX	635,8	kg/s
Tank-side flowrate through storage HX	1224,9	kg/s
Field-side pump auxiliary power	1329,6	kW
Tank-side pump auxiliary power	471,9	kW
Storage system other auxiliary power	0	kW
Heat transfer to network	139203	kW
Heat transfer to fluid in field	278187	kW
Heat transfer to storage system	138727	kW
Heat loss from storage HX & piping	1387,3	kW
Percentage of heat transfer to field that is stored	49,87	%

Tabla 3.27: Variables Campo solar (colectores)

<b>Estimated Collector and Field Dimensions</b>		
<b>Solar Field w/ Storage [66]</b>		
<b>1. Reflector Cross Section</b>		
Reflector type: Parabolic trough		
Optical efficiency at 0 degrees incidence	75	%
Incident angle optical efficiency factor	1	
Reflector cleanliness factor	0,95	
Reflector end loss factor	1	
Estimated shaded aperture percentage	0	%
Receiver outside diameter	70	mm
Receiver wall thickness	2,667	mm
Receiver inside diameter	64,67	mm
Receiver tube material	TP321H	
Receiver glass envelope outside diameter	136	mm
Receiver glass envelope wall thickness	3	mm
Reflector aperture width	5,77	m
Reflector depth	1,217	m
Reflector focal length	1,71	m
Geometric concentration	82,43	
Rim angle	80,3	degrees
Ratio of reflector focal length to aperture width	0,2964	
<b>2. Reflector Row (each)</b>		
Row pitch	14,42	m
Row length	217,6	m
Reflector length	206,8	m
Unused reflector length due to end loss	0	m
Reflector aperture area	1193	m <sup>2</sup>
Reflective area	1322,2	m <sup>2</sup>
Number of reflector rows per liquid flow path	2	
<b>3. Flow Path (each)</b>		
Receiver tube outside diameter	70	mm
Receiver tube inside diameter	64,67	mm
Receiver tube wall thickness	2,667	mm
Receiver tube internal absolute roughness	0,0457	mm
Illuminated (heated) length	413,5	m
Physical length of all straight runs	453,1	m
Equivalent length of all fittings	9,441	m
Total equivalent length	462,6	m

Total number of fittings	6	
Number short 90 deg. elbows	4	
Number gate valves	2	
<b>4. Field</b>		
Number of reflector rows	432	
Number of liquid flow paths	216	
Reflector aperture area	515358	m <sup>2</sup>
Reflective area	571203	m <sup>2</sup>
Row pitch	14,42	m
Tracking axis rotation away from north	0	degrees
Tracking axis tilt away from level	0	degrees
Collector field length perpendicular to tracking axis	533,7	m
Collector field length parallel to tracking axis	2864	m
Collector field required land area	1528611	m <sup>2</sup>
Collector field required land area	152,9	hectare

Diagrama de flujo del almacenamiento:

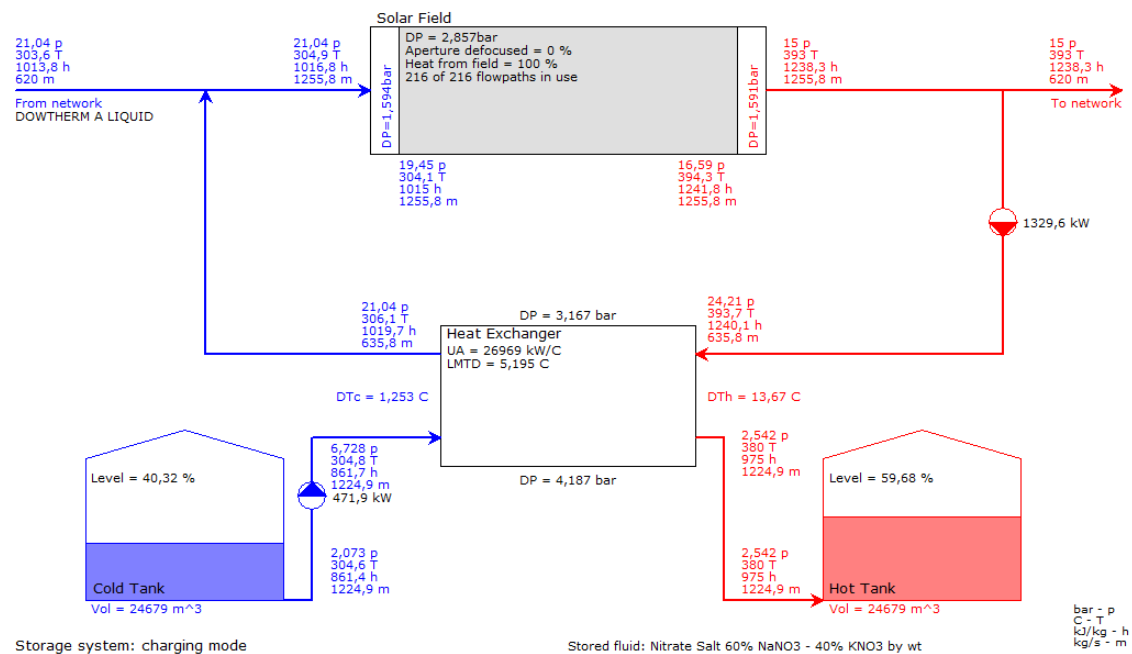


Figura 3.50: Esquema Campo solar (almacenamiento)

**- Intercambiadores vapor/HTF (General HX - S):**

Se modelan con el mismo elemento que usamos anteriormente para el intercambiador vapor de sello - condensado, aunque al trabajar con 2 fluidos diferentes, la definición de parámetros es ligeramente distinta. Desde el lado del vapor, uno de ellos se encuentra previo a la entrada al cuerpo de alta y el otro antecede al cuerpo de baja. Operativamente funcionan de forma similar, con la diferencia de que el que produce vapor vivo se alimenta con un caudal de HTF mucho mayor. No obstante, las condiciones de entrada del HF en cada uno de ellos son similares.

Tabla 3.28: Parámetros Intercambiadores de calor vapor/HTF

General HX-S	HX Design Specification Method	HX SS Configuration	HS Heat Transfer Specification	Main outlet state (Temperature [°C] and quality)	Flow priority
67	SS (Specify both outlet states or heat transfer, main flow set by network and secondary flow set by component)	Define A path as main stream (vapor)	By main stream exit state	385 °C (Superheated)	Weak
68		Define A path as main stream (vapor)	By main stream exit state	385 °C (Superheated)	Strong

Se muestran a continuación los respectivos esquemas, así como los datos de sus balances y sus diagramas T-Q.

General HX - S 67

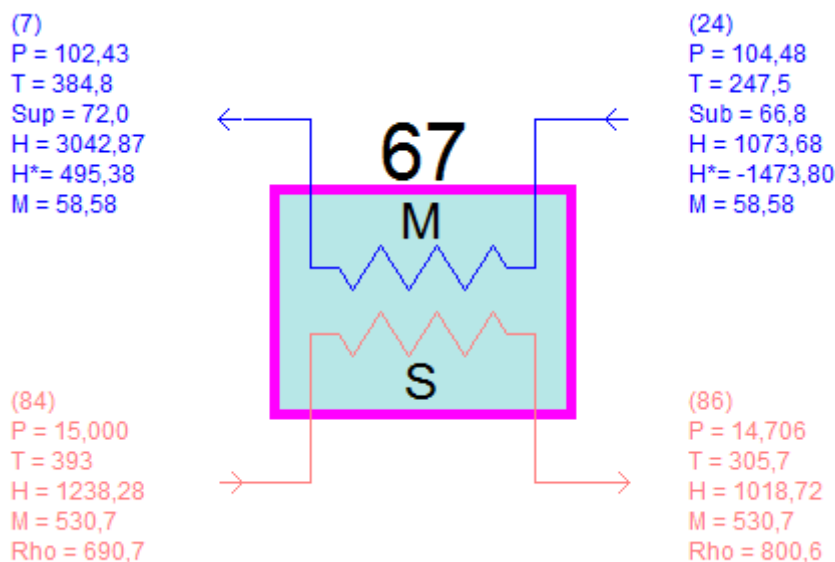


Figura 3.51: Esquema Intercambiador de calor vapor/HTF 67

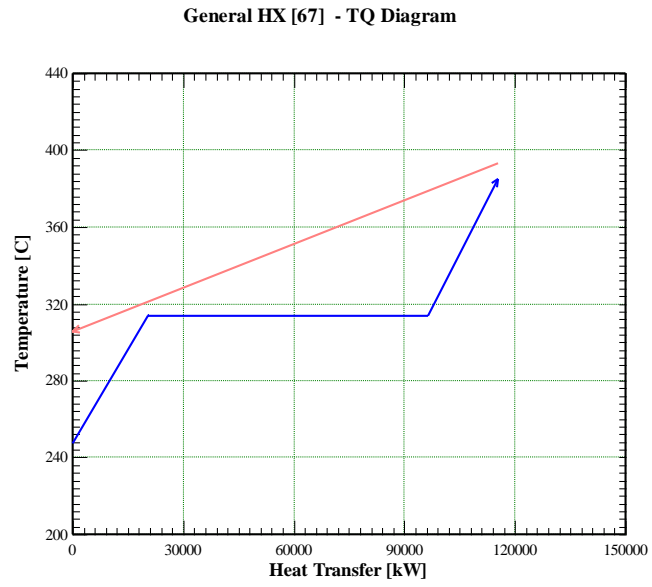


Figura 3.52: Diagrama T-Q Intercambiador de calor vapor/HTF 67

Tabla 3.29: Variables Intercambiador de calor vapor/HTF 67

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>General HX [67]</b>		
<b>Main Path - Water</b>		
Molecular weight	18,02	
Inlet pressure	104,5	bar
Inlet temperature	247,5	C
Inlet flow	58,58	kg/s
Inlet enthalpy	1073,7	kJ/kg
Exit pressure	102,4	bar
Exit temperature	384,8	C
Exit enthalpy	3043	kJ/kg
Pressure drop	2,048	bar
<b>Secondary Path - Heat Transfer Fluid</b>		
Heat transfer fluid	DOWTHERM A LIQUID	
HTF concentration	100	%
Inlet pressure	15	bar
Inlet temperature	393	C
Inlet flow	530,7	kg/s
Inlet enthalpy	1238,3	kJ/kg
Exit pressure	14,71	bar
Exit temperature	305,7	C
Exit enthalpy	1018,7	kJ/kg
Pressure drop	0,294	bar
<b>Performance</b>		
Heat transfer	115360	kW
Heat loss	1165,2	kW
Current UA	4337	kW/C
Design point UA	4337	kW/C
Pinch	7,663	C



General HX - S 68

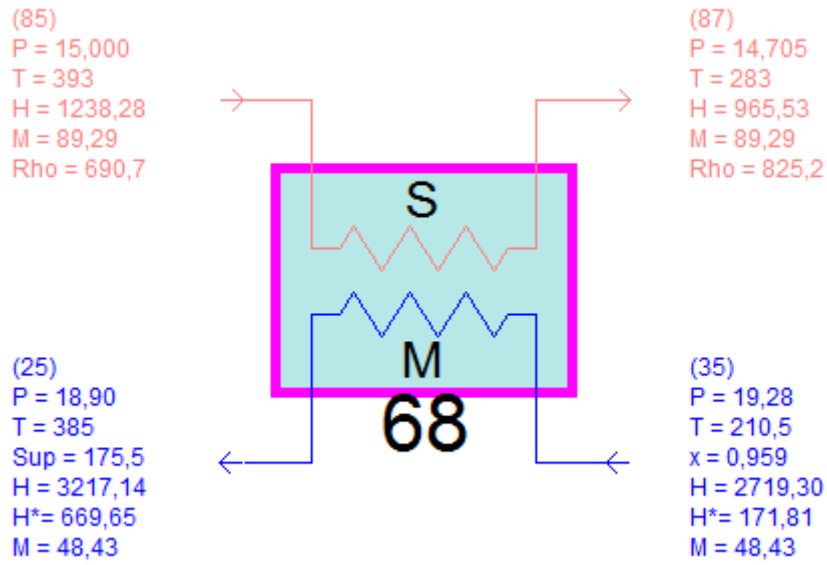


Figura 3.53: Esquema Intercambiador de calor HTF/vapor 68

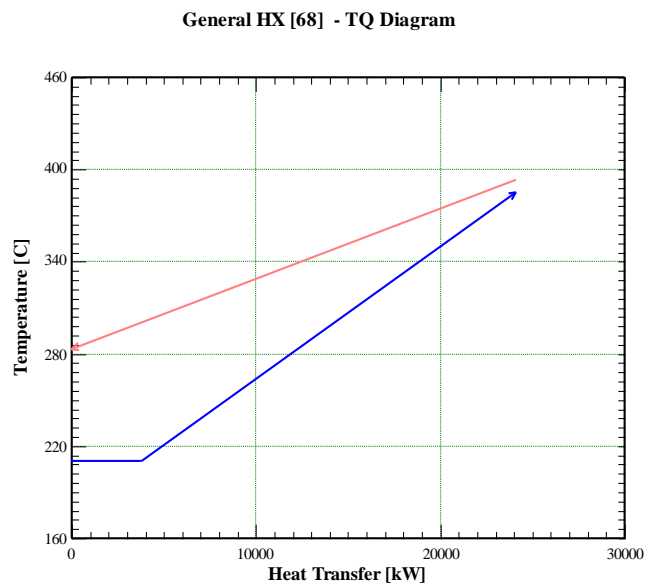


Figura 3.54: Diagrama T-Q Intercambiador de calor HTF/vapor 68

Tabla 3.30: Variables Intercambiador de calor HTF/vapor 68

<b>Off-design Heat Balance Results</b>		
<b>General HX [68]</b>		
<b>Main Path - Water</b>		
Molecular weight	18,02	
Inlet pressure	19,28	bar
Inlet temperature	210,5	C
Inlet flow	48,43	kg/s
Inlet enthalpy	2719,3	kJ/kg
Exit pressure	18,9	bar
Exit temperature	385	C
Exit enthalpy	3217	kJ/kg
Pressure drop	0,3779	bar
<b>Secondary Path - Heat Transfer Fluid</b>		
Heat transfer fluid	DOWTHERM A LIQUID	
HTF concentration	100	%
Inlet pressure	15	bar
Inlet temperature	393	C
Inlet flow	89,29	kg/s
Inlet enthalpy	1238,3	kJ/kg
Exit pressure	14,71	bar
Exit temperature	283	C
Exit enthalpy	965,5	kJ/kg
Pressure drop	0,2949	bar
<b>Performance</b>		
Heat transfer	24111	kW
Heat loss	243,5	kW
Current UA	648	kW/C
Design point UA	647,9	kW/C
Pinch	7,991	C

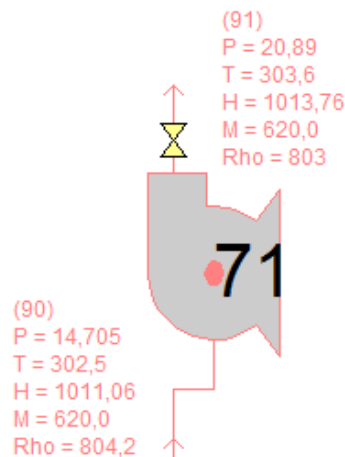
**- Bomba de HTF (General Pump):**

Este elemento es el mismo que usamos para el ciclo de vapor. La definición del fluido de trabajo se realiza mediante el ítem que se explica a continuación de éste. Una vez más, carecemos de información con la que elegir parámetros determinantes de la bomba, con lo que permitiremos que el software se encargue de seleccionar sus características.

Tabla 3.31: Parámetros Bomba HTF

General Pump	Pump type
71	Single stage centrifugal

Se muestra a continuación su esquema básico, los datos de balance y la correspondiente curva Altura-Caudal.



P[bar] T[C] H[kJ/kg] M[kg/s]  
 General Pump [71]  
 Mode: Off-design (Network determines flow)  
 Number of existing pumps per station = 1, Number operating = 1  
 Pump type: Single stage centrifugal  
 Pump driven by Integral motor:  
 Electricity consumption = 1807,3 kW, Hydraulic pumping power = 1677,2 kW  
 Pump apparent isentropic efficiency = 28,41 %  
 Pressure rise (before control valve) = 15,46 bar, dP across valve = 9,276 bar, Overall pressure rise = 6,182 bar  
 Motor nameplate shaft power (each) = 2610 kW, 2610 kWe  
 Nameplate shaft speed = 1500 RPM (fixed RPM)  
 Recirculation ratio = 0 , RR cooling load = 0 kW  
 Pump suction density = 804,2 kg/m<sup>3</sup>

Motor of General Pump [71]  
 There is 1 unit per station. Powers shown below are per unit.  
 Motor nameplate power = 2441,3 kW Nameplate efficiency = 96,7 %  
 Nameplate / Design point load = 1,021  
 Electricity consumption = 1807,3 kW Shaft power = 1743,9 kW(2338,6 hp)  
 Motor electrical loss = 63,32 kW  
 Motor efficiency = 96,5 %  
 Heat transfer fluid = DOWTHERM A LIQUID

Figura 3.55: Esquema Bomba HTF

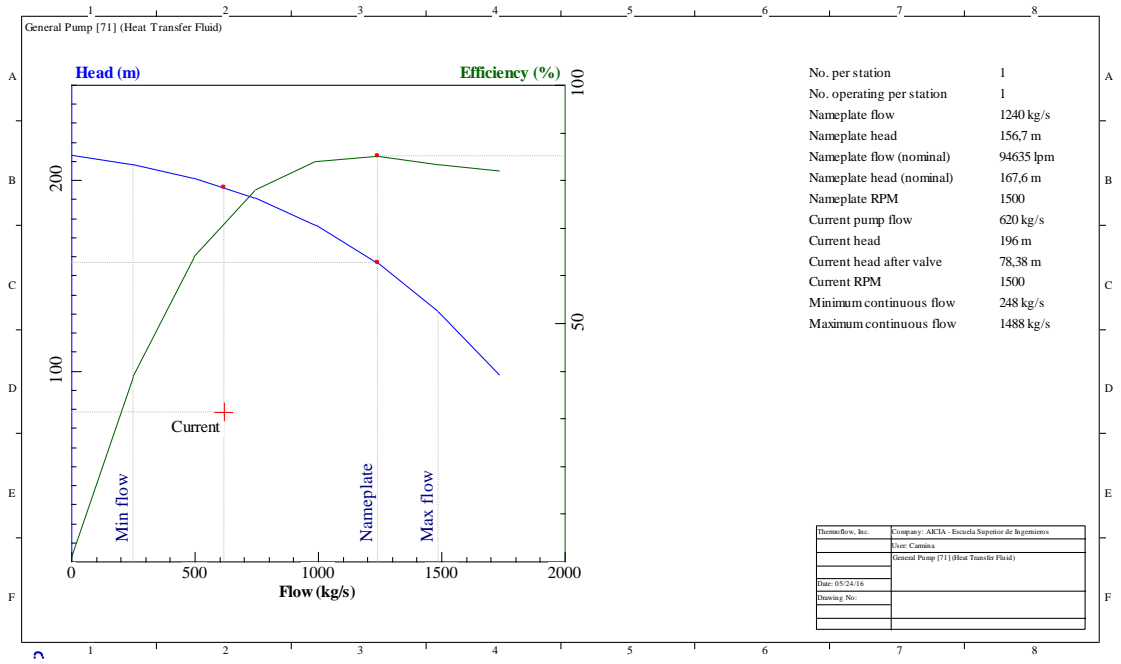


Figura 3.56: Curva Altura-Caudal Bomba HTF

Tabla 3.32: Variables Bomba HTF

<b>Off-design Heat Balance Results - Network determines flow</b>		
<b>General Pump [71]</b>		
Type	Fixed RPM	
Number per station	1	
Number operating	1	
<b>Suction Side (each)</b>		
Pressure	14,71	bar
Temperature	302,5	C
Mass flow	620	kg/s
Enthalpy	1011,1	kJ/kg
Density	804,2	kg/m <sup>3</sup>
<b>Delivery Side (each)</b>		
Pressure	20,89	bar
Temperature	303,6	C
Mass flow	620	kg/s
Enthalpy	1013,8	kJ/kg
<b>Performance Data (each)</b>		
Pump pressure rise	15,46 (196)	bar (m)
Pressure rise after valve pressure drop	6,182 (78,38)	bar (m)
Pump shaft speed	1500	RPM
Pump isentropic efficiency	71,05	%
Pump apparent isentropic efficiency	28,41	%
Pump hydraulic work	1677,2	kW
Pump mechanical efficiency	96,17	%
Pump shaft work	1743,9	kW
Recirculation ratio	0	
Recirculation cooling load	0	kW
Motor efficiency	96,5	%
Electricity consumption	1807,3	kW

**Selección del fluido de transmisión de calor (HTF Specification):**

Este elemento se usa simplemente para definir el fluido de trabajo en un ciclo. No afecta en ningún momento a los parámetros de la corriente ya que no se corresponde con ningún equipo físico. En nuestro caso el fluido usado es el Dowtherm A. Este fluido está diseñado para trabajar con una temperatura máximas de 427,6 °C y una mínima de 12,78 °C. El resto de características pueden consultarse en un manual especializado.

Tabla 3.33: Parámetros Elemento HTF Specification

HTF Specification	Fluid definition	Function	Flow priority
74	Pick fluid from library	Enforce continuity	Very weak

El esquema de este ítem es el siguiente:

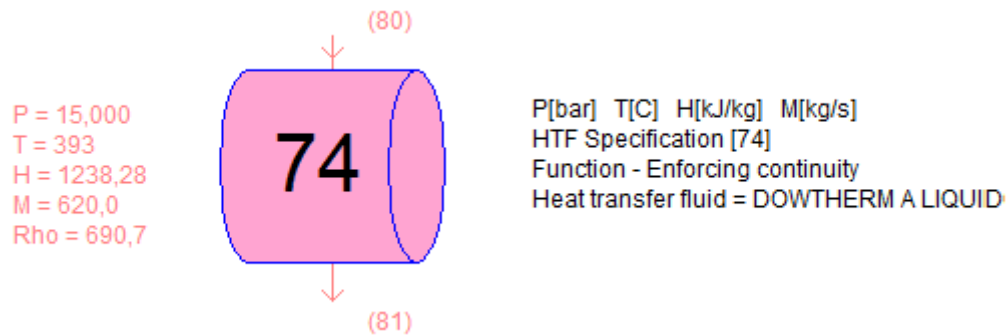


Figura 3.57: Esquema Elemento HTF Specification

**- Tuberías HTF (Pipe):**

Este elemento es el mismo que se utilizó para el ciclo de vapor. Si bien, aunque se implementaron desde el principio para poder tener en cuenta las pérdidas de calor y/o presión que se produjesen en este circuito, no hemos tenido acceso a datos que nos permitiesen definirlos. Es por ello, que se han considerado ideales en el desarrollo del proyecto, y a todos los efectos, es como si no existieran. No obstante, entendemos que cualquier pérdida de presión producida en los conductos, podría ser suministrada por la bomba. A tal efecto, podemos considerar que los datos del consumo de la bomba (General Pump [71]) están subvalorados y, por consiguiente, los valores del rendimiento del sistema son ligeramente superiores a los reales.

En el modelado, no obstante, aparecen gráficamente representados sus iconos, coincidentes en cualquier caso con el modelo presentado para el ciclo de vapor. Su numeración corresponde a los elementos: Pipe 72, 73, 75, 76, 77 y 78. Los flujos que circulan por ellos se representan en el apartado **Corrientes (Streams)**.

Una vez presentados todos los elementos que forman parte del modelo del ciclo de HTF, mostramos el esquema de dicho circuito *figura 3.3*. Las etiquetas de las corrientes 7, 24, 25 y 35 conectan directamente con el ciclo de vapor.

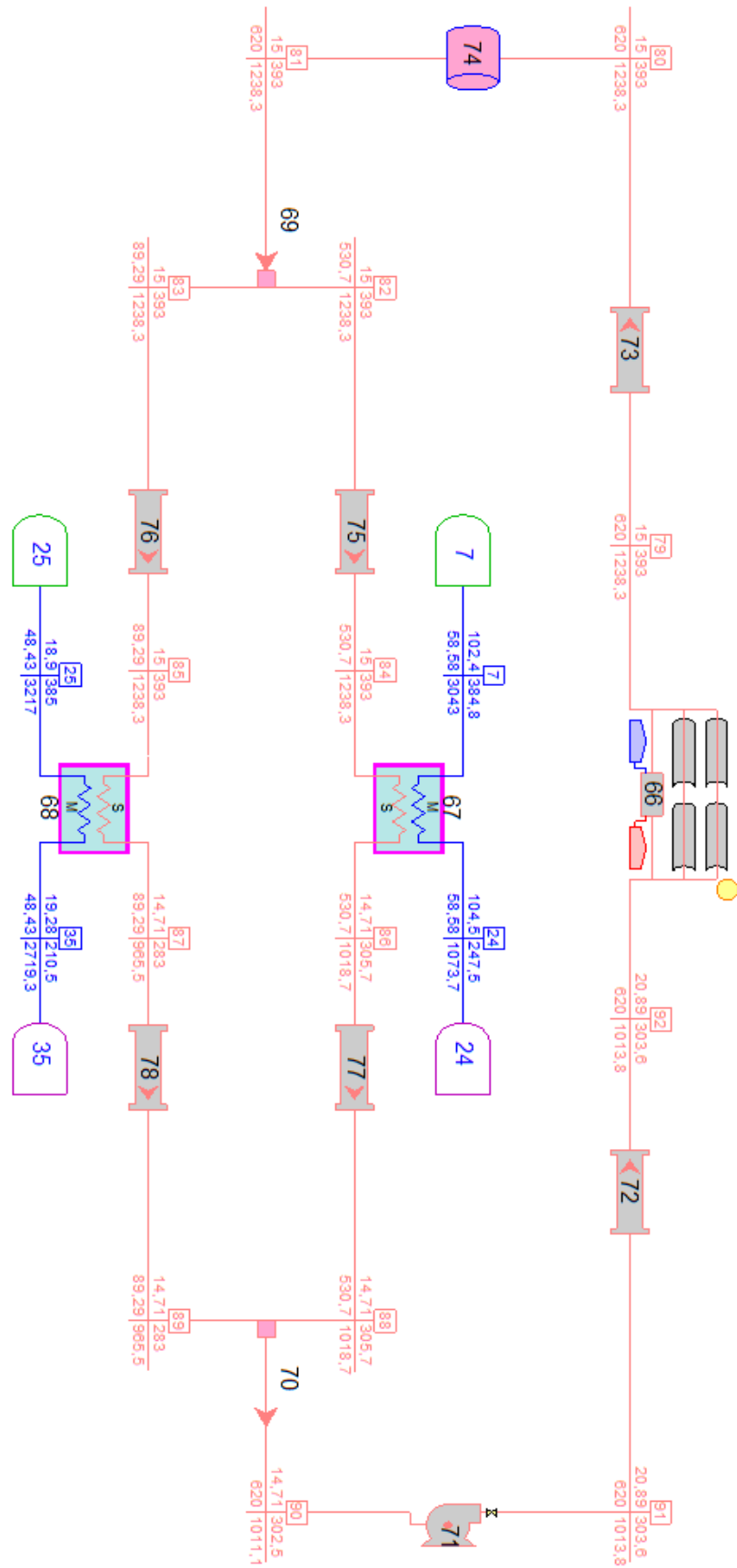


Figura 3.58: Esquema Circuito HTF





### 3.3 Corrientes (Streams)

En este apartado se presenta un listado con las 78 corrientes numeradas que circulan por nuestro modelo, y se definen sus parámetros principales: presión, temperatura, flujo másico y entalpía. Nótese que la numeración llega hasta 92 debido a que hay una discontinuidad, pasando de la corriente 64 a la 79 y de ésta a la 80. Esto ocurre porque durante el diseño del modelo se creó una plantilla intermedia para realizar correctamente el conexionado de los equipos. Dicha plantilla se eliminó al concluir, pero el software conservó la numeración.

Tabla 3.34: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF

Nº Corriente	Fluido	P [bar]	T [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	H [kJ/kg]
1	Water	0,3989	28,44	46,6	119,2
2	Water	100	383	58,58	3043
3	Water	42,93	268,7	57,95	2852,7
4	Water	42,93	268,7	6,578	2852,7
5	Water	41,77	267,1	6,578	2852,7
6	Water	104,5	247,5	58,58	1073,7
7	Water	102,4	384,8	58,58	3043
8	Water	42,93	268,7	51,37	2852,7
9	Water	19,76	211,8	51,21	2717,8
10	Water	19,76	211,8	2,739	2717,8
11	Water	19,16	210,2	2,739	2717,8
12	Water	106,6	204,7	58,58	876,9
13	Water	41,77	252,9	6,578	1100
14	Water	19,76	211,8	48,47	2717,8
15	Water	19,76	211,8	48,47	2717,8
16	Water	41,77	252,9	6,578	1100
17	Water	19,16	210,2	9,316	898,8
18	Water	19,16	210,2	9,316	898,8
19	Water	10,67	177,6	58,58	752,4

20	Water	108,7	180,2	58,58	769,3
21	Water	19,47	211	0,0388	902,5
22	Water	19,47	211	0,0388	902,5
23	Water	19,47	211	48,43	2719,3
24	Water	104,5	247,5	58,58	1073,7
25	Water	18,9	385	48,43	3217
26*	Water	18	383,4	48,43	3215
27	Water	9,952	317	49,02	3088
28	Water	9,952	317	2,512	3088
29	Water	9,481	306,1	2,706	3066
30	Water	10,67	139,8	46,52	588,5
31	Water	9,952	317	46,51	3088
32	Water	4,311	222,1	46,55	2905,8
33	Water	4,311	222,1	3,376	2905,8
34	Water	4,185	221,9	3,376	2905,8
35	Water	19,28	210,5	48,43	2719,3
36	Water	4,185	145,3	3,376	611,8
37	Water	10,89	100,5	46,52	422,1
38	Water	4,311	222,1	43,18	2905,8
39	Water	4,185	145,3	3,376	611,8
40	Water	1,29	107,8	43,18	2688,3
41	Water	1,29	107,8	2,362	2688,3
42	Water	1,253	107,6	2,362	2688,3
43	Water	1,29	107,8	40,81	2688,3
44	Water	0,4331	77,78	40,81	2527,3
45	Water	0,4331	77,78	2,609	2527,3

46	Water	0,4025	76,01	2,609	2527,3
47	Water	1,253	106	5,738	444,6
48	Water	1,228	105,5	5,738	444,6
49	Water	11,1	70,5	46,52	296
50	Water	0,4331	77,78	38,21	2527,3
51	Water	0,04	28,97	38,26	2334,3
52	Water	0,04	28,97	38,26	2334,3
53	Water	1,014	12,62	2536	53,02
54	Water	0,1168	20,64	2536	86,53
55	Water	0,3624	34,74	8,347	145,5
56	Water	0,04	28,97	8,347	145,5
57	Water	0,04	28,97	46,6	1942,3
58	Water	0,3989	28,44	46,52	119,2
59	Water	11,55	28,72	46,52	121,4
60	Water	11,33	29,73	46,52	125,5
61	Water	1,007	133,5	0,0827	2743,7
62	Water	1,007	94,48	0,0827	395,8
63	Water	9,952	181,3	0,1936	2781,3
64	Water	9,952	306,7	2,706	3066
79	HTF	15	393	620	1238,3
80	HTF	15	393	620	1238,3
81	HTF	15	393	620	1238,3
82	HTF	15	393	530,7	1238,3
83	HTF	15	393	89,29	1238,3
84	HTF	15	393	530,7	1238,3
85	HTF	15	393	89,29	1238,3

86	HTF	14,71	305,7	530,7	1018,7
87	HTF	14,71	283	89,29	965,5
88	HTF	14,71	305,7	530,7	1018,7
89	HTF	14,71	283	89,29	965,5
90	HTF	14,71	302,5	620	1011,1
91	HTF	20,89	303,6	620	1013,8
92	HTF	20,89	303,6	620	1013,8

\*El flujo másico de esta corriente será nuestro parámetro de control del ciclo y queda fijada.

Una vez diseñado y concluido el modelo, pasamos al modo Off-design, en el que los equipos ya están completamente definidos, por lo que los parámetros modificables son aquellos que pueden serlo durante la operación del sistema.



## 4 Modelado de la Planta a Carga Parcial

En este capítulo el objetivo será ajustar el funcionamiento del modelo a diversas condiciones de carga parcial adaptándonos a las condiciones de funcionamiento provistas por el equipo a cargo del proyecto. Estas condiciones se alcanzarán en la realidad cuando, no disponiendo de energía en el sistema suficiente en el almacenamiento, la radiación solar sea inferior a una cierta cantidad. Para encontrar tales niveles de radiación, tendremos que realizar un proceso iterativo, por lo que interesa involucrar el menor número de variables posible.

Una vez ajustado nuestro modelo a los 4 regímenes de carga adicionales (a saber, 75%, 50%, 25% de la carga, más una situación adicional  $\approx 20\%$  que constituye el límite técnico de funcionamiento de la turbina), se obtendrán correlaciones que se implementarán posteriormente en el complemento ELINK para el análisis de la planta en régimen dinámico.

### 4.1 Situaciones de carga parcial

Los datos de las condiciones del vapor vivo a carga parcial suministrados por la empresa fueron los siguientes:

- 75% de carga:	75,0 bara	/ 373,7°C	/ 44,43 kg/s	(41,25 MWe).
- 50% de carga:	50,8 bara	/ 360,7°C	/ 29,67 kg/s	(27,50 MWe).
- 25% de carga:	27,8 bara	/ 351,9°C	/ 15,98 kg/s	(13,75 MWe).

Entre paréntesis se muestra la potencia bruta dada por la turbina en cada caso.

Además, se nos informaba de que no se habían obtenido valores para el caso del funcionamiento cercano al mínimo técnico, y que para el ajuste en esas condiciones la única información de la que dispondríamos sería que la turbina debía trabajar ofreciendo una potencia bruta de como mínimo 11 MWe.

Puesto que ya han sido definidos todos los equipos involucrados, en esta sección no se hará un nuevo desglose del funcionamiento de cada uno. No obstante, si se incluirá información relativa a todas las corrientes de nuestro sistema, como se hizo en la sección 3.3, la cual a todos los efectos supone el caso particular de funcionamiento al 100% de la carga.

En cualquier caso, junto con este documento se adjuntan todos los archivos correspondientes a los modelos aquí definidos, así como cualquier otro empleado en la realización de este proyecto, con lo que pueden ser consultados en cualquier momento.

#### 4.1.1 Funcionamiento al 75% de carga

Condiciones del vapor vivo y potencia pretendidas:

- $\dot{m}_{vv} = 44,43 \text{ kg/s}$
- $p_{vv} = 75,0 \text{ bara}$
- $T_{vv} = 373,7 \text{ °C}$
- $P_{bruta} = 41,25 \text{ MWe}$

El procedimiento de ajuste será equivalente para cada situación. En primer lugar, ajustamos el caudal de vapor que circula por la turbina. Como se ha explicado anteriormente, nuestra regulación la realizamos modificando el flujo másico de entrada al cuerpo de baja, con lo que tendremos que ir probando hasta conseguir los 44,43 kg/s en la entrada al cuerpo de alta de la turbina.

Acto seguido desconectamos el sistema de almacenamiento del campo solar, abrimos todos los lazos de los receptores y vamos disminuyendo la irradiación solar (con una precisión de  $1\text{W/m}^2$ ) hasta lograr la potencia bruta indicada. Llegados aquí, comprobamos si existen errores en el sistema.

Normalmente, una vez ajustada la potencia, el caudal de vapor vivo se ve afectado, ya que el programa trata de mantener las condiciones iniciales de trabajo de la turbina, con lo que recalcula el agua de aporte de las fuentes disponibles. Por otro lado, si las condiciones de trabajo de alguno de los equipos distan demasiado de las calculadas para el punto de diseño, el programa nos lo notificará y el cálculo se detendrá. En cualquiera de los dos casos, deberemos volver a ajustar el caudal e iterar en el procedimiento.

Nuestra prioridad es conseguir que la turbina trabaje al 75% de la carga con el menor nivel de radiación posible, lo que implica a la postre alcanzar el mayor rendimiento posible en el sistema.

El ajuste óptimo para nuestro modelo trabajando a dicho porcentaje de carga se obtiene para los siguientes valores de los parámetros listados a continuación:

- **Stream 26** (Caudal de entrada al cuerpo de baja): 37,35 kg/s

- **\*P<sub>mín</sub>** (Presión mínima de trabajo en el desaireador): 6,633 bar

- **Id** (Irradiación mínima necesaria para este régimen de trabajo):  $369\text{ W/m}^2$

\*Este parámetro no se ve modificado respecto a la situación de trabajo al 100% de la carga en este supuesto, pero sí será necesario en los siguientes.

Las condiciones conseguidas para nuestro modelo son las siguientes:

- |                                      |                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| · $\dot{m}_{vv} = 44,44\text{ kg/s}$ | · $p_{vv} = 74,15\text{ bara}$   |
| · $T_{vv} = 342,4\text{ °C}$         | · $P_{bruta} = 41,35\text{ MWe}$ |

Tales condiciones se valoran como suficientemente aproximadas a las de referencia, con la salvedad de la temperatura, que como se comprobará también en las siguientes situaciones de carga, será sensiblemente menor. No obstante, lejos de suponer un inconveniente (siempre que se no existan problemas de condensación en los escalonamientos de turbina), la disminución de la temperatura resulta favorable. Es por ello que consideramos el ajuste para esta situación concluido satisfactoriamente.

A continuación, se exponen una tabla con los parámetros principales de todas las corrientes en este supuesto de carga:



Tabla 4.1: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 75% de carga

Nº Corriente	Fluido	P [bar]	T [°C]	M [kg/s]	H [kJ/kg]
1	Water	0,3923	25,34	36,15	106,2
2	Water	74,14	342,3	44,43	2980,3
3	Water	32,44	238,5	43,95	2804,2
4	Water	32,44	238,5	4,447	2804,2
5	Water	31,78	237,3	4,447	2804,2
6	Water	77,39	233,2	44,43	1006,3
7	Water	75,9	343,9	44,43	2980,3
8	Water	32,44	238,5	39,51	2804,2
9	Water	15,35	199,4	39,38	2679,5
10	Water	15,35	199,4	1,981	2679,5
11	Water	14,95	198,2	1,981	2679,5
12	Water	78,59	194	44,43	828,1
13	Water	31,78	237,1	4,447	1023,6
14	Water	15,35	199,4	37,39	2679,5
15	Water	15,35	199,4	37,39	2679,5
16	Water	31,78	237,1	4,447	1023,6
17	Water	14,95	198,2	6,428	844,1
18	Water	14,95	198,2	6,428	844,1
19	Water	8,665	167,6	44,43	708,6
20	Water	79,82	171,2	44,43	728,3
21	Water	15,12	198,7	0,044	846,5
22	Water	15,12	198,7	0,044	846,5
23	Water	15,12	198,7	37,35	2681,8
24	Water	77,39	233,2	44,43	1006,3
25	Water	14,69	388,7	37,35	3232

Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos Mediante Thermoflex

26*	Water	13,99	387,2	37,35	3230
27	Water	7,775	321,1	37,8	3102
28	Water	7,775	321,1	1,736	3102
29	Water	7,469	305,5	1,929	3070
30	Water	8,665	132,7	36,03	558
31	Water	7,775	321,1	36,07	3102
32	Water	3,386	226,5	36,1	2918,6
33	Water	3,386	226,5	2,429	2918,6
34	Water	3,302	226,3	2,429	2918,6
35	Water	14,98	198,2	37,35	2681,8
36	Water	3,302	136,8	2,429	575,6
37	Water	8,793	95,34	36,03	400,1
38	Water	3,386	226,5	33,67	2918,6
39	Water	3,302	136,8	2,429	575,6
40	Water	1,018	111,4	33,67	2699
41	Water	1,018	111,4	1,652	2699
42	Water	0,9949	111,3	1,652	2699
43	Water	1,018	111,4	32,02	2699
44	Water	0,3399	71,99	32,02	2536,7
45	Water	0,3399	71,99	2,089	2536,7
46	Water	0,315	70,22	2,089	2536,7
47	Water	0,9949	99,47	4,081	416,8
48	Water	0,9845	99,17	4,081	416,8
49	Water	8,924	67,86	36,03	284,8
50	Water	0,3399	71,99	29,93	2536,7
51	Water	0,0334	25,88	29,98	2346,5
52	Water	0,0334	25,88	29,98	2346,5

53	Water	1,014	12,62	2536	53,02
54	Water	0,1168	18,98	2536	79,55
55	Water	0,315	30,23	6,17	126,6
56	Water	0,0334	25,88	6,17	126,6
57	Water	0,0334	25,88	36,15	1967,5
58	Water	0,3923	25,34	36,03	106,2
59	Water	9,193	25,76	36,03	108,8
60	Water	9,057	26,57	36,03	112,2
61	Water	1,007	133,5	0,0466	2743,7
62	Water	1,007	29,86	0,0466	125,2
63	Water	7,775	174,8	0,1936	2781,3
64	Water	7,775	305,8	1,929	3070
79	HTF	15	393	390,8	1238,3
80	HTF	15	393	390,8	1238,3
81	HTF	15	393	390,8	1238,3
82	HTF	15	393	314,7	1238,3
83	HTF	15	393	76,17	1238,3
84	HTF	15	393	314,7	1238,3
85	HTF	15	393	76,17	1238,3
86	HTF	14,9	279,2	314,7	956,7
87	HTF	14,79	283	76,17	965,5
88	HTF	14,9	279,2	314,7	956,7
89	HTF	14,79	283	76,17	965,5
90	HTF	14,79	279,9	390,8	958,4
91	HTF	15,7	281,6	390,8	962,3
92	HTF	15,7	281,6	390,8	962,3

\*El flujo másico de esta corriente es nuestro parámetro de control del ciclo y está fijado.

#### 4.1.2 Funcionamiento al 50% de carga

Condiciones del vapor vivo y potencia pretendidas:

$$\begin{array}{ll} \cdot \dot{m}_{vv} = 29,67 \text{ kg/s} & \cdot p_{vv} = 50,80 \text{ bara} \\ \cdot T_{vv} = 360,7 \text{ °C} & \cdot P_{bruta} = 27,50 \text{ MWe} \end{array}$$

El procedimiento de ajuste es equivalente al del caso anterior, con la salvedad de que ahora además debemos incluir la presión mínima del desaireador como variable. En primer lugar, ajustamos el caudal de vapor que circula por la turbina. Análogamente, modificamos el flujo másico de entrada al cuerpo de baja, desconectamos el sistema de almacenamiento del campo solar, abrimos todos los lazos de los receptores y vamos disminuyendo la irradiación solar (con una precisión de  $1 \text{ W/m}^2$ ) hasta lograr la potencia bruta indicada. Llegados aquí, comprobamos posibles errores en el sistema.

En este caso, el programa devuelve un error relativo a un balance de energía erróneo. Se debe a que la presión mínima fijada para el desaireador en el punto de diseño es demasiado alta para ser satisfecha con las condiciones de presión permitidas por el nuevo caudal másico que circula por esa parte del circuito. Una vez incluida esta nueva variable continuamos con el proceso iterativo.

De nuevo, nuestra prioridad es conseguir que la turbina trabaje al 50% de la carga con el menor nivel de radiación posible.

El ajuste óptimo para nuestro modelo trabajando al 50% de la carga se obtiene para los siguientes valores de los parámetros listados a continuación:

- **Stream 26** (Caudal de entrada al cuerpo de baja):  $25,55 \text{ kg/s}$
- **Pmín** (Presión mínima de trabajo en el desaireador):  $4,761 \text{ bar}$
- **Id** (Irradiación mínima necesaria para este régimen de trabajo):  $273 \text{ W/m}^2$

Las condiciones conseguidas para nuestro modelo son las siguientes:

$$\begin{array}{ll} \cdot \dot{m}_{vv} = 29,68 \text{ kg/s} & \cdot p_{vv} = 48,98 \text{ bara} \\ \cdot T_{vv} = 305,3 \text{ °C} & \cdot P_{bruta} = 27,56 \text{ MWe} \end{array}$$

Tales condiciones se valoran como suficientemente aproximadas a las de referencia, de nuevo, con la salvedad de la temperatura.

Se presenta seguidamente la tabla con los parámetros principales de todas las corrientes en este supuesto de carga:

Tabla 4.2: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 50% de carga

Nº Corriente	Fluido	P [bar]	T [°C]	M [kg/s]	H [kJ/kg]
1	Water	0,3861	21,94	24,92	91,96
2	Water	49,03	305,3	29,68	2945,6
3	Water	21,89	217	29,36	2778,3
4	Water	21,89	217	2,514	2778,3
5	Water	21,58	216,3	2,514	2778,3
6	Water	51,15	213,9	29,68	916,7
7	Water	50,19	306,6	29,68	2945,6
8	Water	21,89	217	26,84	2778,3
9	Water	10,57	182,3	26,75	2659,7
10	Water	10,57	182,3	1,167	2659,7
11	Water	10,38	181,5	1,167	2659,7
12	Water	51,69	178,8	29,68	759,9
13	Water	21,58	216,3	2,514	926,4
14	Water	10,57	182,3	25,59	2659,7
15	Water	10,57	182,3	25,59	2659,7
16	Water	21,58	216,3	2,514	926,4
17	Water	10,38	181,5	3,681	769,8
18	Water	10,38	181,5	3,681	769,8
19	Water	6,424	153,5	29,68	647,5
20	Water	52,23	158,6	29,68	672,3
21	Water	10,42	181,7	0,0358	770,6
22	Water	10,42	181,7	0,0358	770,6
23	Water	10,42	181,7	25,55	2662,4
24	Water	51,15	213,9	29,68	916,7
25	Water	10,12	391	25,55	3245

26*	Water	9,646	389,7	25,55	3243
27	Water	5,395	324,5	25,85	3114
28	Water	5,395	324,5	1	3114
29	Water	5,228	298,2	1,194	3060
30	Water	6,424	122,1	24,77	513
31	Water	5,395	324,5	24,85	3114
32	Water	2,363	230,2	24,87	2930,1
33	Water	2,363	230,2	1,524	2930,1
34	Water	2,316	230,1	1,524	2930,1
35	Water	10,32	181,3	25,55	2662,4
36	Water	2,316	124,9	1,524	524,7
37	Water	6,485	87,04	24,77	365
38	Water	2,363	230,2	23,35	2930,1
39	Water	2,316	124,9	1,524	524,7
40	Water	0,7135	114,4	23,35	2708,5
41	Water	0,7135	114,4	1,061	2708,5
42	Water	0,6995	114,4	1,061	2708,5
43	Water	0,7135	114,4	22,29	2708,5
44	Water	0,2383	63,9	22,29	2546,5
45	Water	0,2383	63,9	1,333	2546,5
46	Water	0,2242	62,54	1,333	2546,5
47	Water	0,6995	89,91	2,585	376,6
48	Water	0,6958	89,77	2,585	376,6
49	Water	6,546	61,04	24,77	256
50	Water	0,2383	63,9	20,95	2546,5
51	Water	0,0272	22,47	21,01	2369,8
52	Water	0,0272	22,47	21,01	2369,8

53	Water	1,014	12,62	2536	53,02
54	Water	0,1168	17,15	2536	71,91
55	Water	0,2242	24,68	3,918	103,4
56	Water	0,0272	22,47	3,918	103,4
57	Water	0,0272	22,47	24,92	2013,6
58	Water	0,3861	21,94	24,77	91,96
59	Water	6,674	22,56	24,77	95,18
60	Water	6,609	22,77	24,77	96,03
61	Water	1,007	123,8	0,0081	2724,1
62	Water	1,007	22,57	0,0081	94,66
63	Water	5,395	167,4	0,1936	2781,3
64	Water	5,395	298,4	1,194	3060
79	HTF	15	393	230,4	1238,3
80	HTF	15	393	230,4	1238,3
81	HTF	15	393	230,4	1238,3
82	HTF	15	393	175,2	1238,3
83	HTF	15	393	55,14	1238,3
84	HTF	15	393	175,2	1238,3
85	HTF	15	393	55,14	1238,3
86	HTF	14,97	250,2	175,2	891,2
87	HTF	14,89	283	55,14	965,5
88	HTF	14,97	250,2	175,2	891,2
89	HTF	14,89	283	55,14	965,5
90	HTF	14,89	258,2	230,4	909
91	HTF	15,31	260,5	230,4	914,2
92	HTF	15,31	260,5	230,4	914,2

\*El flujo másico de esta corriente es nuestro parámetro de control del ciclo y está fijado.

### 4.1.3 Funcionamiento al 25% carga

Condiciones del vapor vivo y potencia pretendidas:

$$\begin{aligned} \cdot \dot{m}_{vv} &= 15,98 \text{ kg/s} & \cdot p_{vv} &= 27,80 \text{ bara} \\ \cdot T_{vv} &= 351,9 \text{ °C} & \cdot P_{bruta} &= 13,75 \text{ MWe} \end{aligned}$$

El procedimiento de ajuste es equivalente al del caso anterior, incluyendo también la presión mínima del desaireador como variable. Una vez más ajustamos el caudal de vapor que circula por la turbina actuando sobre el flujo másico de entrada al cuerpo de baja. Desconectamos el almacenamiento del campo solar, abrimos los lazos y vamos disminuyendo la irradiación solar (con una precisión de  $1\text{W/m}^2$ ) hasta lograr la potencia bruta indicada. Finalmente, comprobamos posibles errores en el sistema e iteramos tantas veces como sea necesario.

En este punto se vuelve especialmente difícil el ajuste, ya que nuestro sistema trabaja en condiciones muy distintas de las de diseño. Esto implica que al intentar realizar cálculos, el software supere el límite de las 300 iteraciones tras el que se detiene y nos muestra un mensaje de error. No obstante, guarda los valores de los parámetros alcanzados, por lo que iniciando el cálculo de nuevo simplemente continúa desde la última iteración realizada.

Un error común es que los intercambiadores no pueden satisfacer las condiciones UA de diseño. Esto se debe a que estamos actuando al mismo tiempo sobre el caudal que circula por ellos y sobre la irradiación recibida, la cual se relaciona directamente con el calor transferido en los intercambiadores. Este hecho vuelve el proceso iterativo lento y tedioso. Hecho que se reflejará en el proceso de simulación dinámica llevado a cabo en el complemento ELINK en un mayor número de iteraciones a realizar por el software cuando nuestra turbina trabaja en condiciones de carga parcial muy baja.

El ajuste óptimo para nuestro modelo trabajando al 25% de la carga se obtiene para los siguientes valores de los parámetros listados a continuación:

- **Stream 26** (Caudal de entrada al cuerpo de baja): 14,20 kg/s
- **Pmín** (Presión mínima de trabajo en el desaireador): 1,014 bar (atmosférica)
- **Id** (Irradiación mínima necesaria para este régimen de trabajo):  $180 \text{ W/m}^2$

Las condiciones conseguidas para nuestro modelo son las siguientes:

$$\begin{aligned} \cdot \dot{m}_{vv} &= 15,99 \text{ kg/s} & \cdot p_{vv} &= 25,39 \text{ bara} \\ \cdot T_{vv} &= 240,3 \text{ °C} & \cdot P_{bruta} &= 13,98 \text{ MWe} \end{aligned}$$

Tales condiciones se valoran como suficientemente aproximadas a las de referencia, de nuevo, con la salvedad de la temperatura.

Se presenta seguidamente la tabla con los parámetros principales de todas las corrientes en este supuesto de carga:



Tabla 4.3: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF al 25% de carga

Nº Corriente	Fluido	P [bar]	T [°C]	M [kg/s]	H [kJ/kg]
1	Water	0,381	18,53	14,03	77,7
2	Water	25,39	240,3	15,99	2851,2
3	Water	11,72	186,9	15,79	2703,1
4	Water	11,72	186,9	1,053	2703,1
5	Water	11,62	186,5	1,053	2703,1
6	Water	26,47	185,5	15,99	788,2
7	Water	25,98	241,4	15,99	2851,2
8	Water	11,72	186,9	14,74	2703,1
9	Water	5,916	158,3	14,69	2599,4
10	Water	5,916	158,3	0,4524	2599,4
11	Water	5,866	158	0,4524	2599,4
12	Water	26,62	156,7	15,99	662,4
13	Water	11,62	186,5	1,053	792,1
14	Water	5,916	158,3	14,23	2599,4
15	Water	5,916	158,3	14,23	2599,4
16	Water	11,62	186,5	1,053	792,1
17	Water	5,866	158	1,505	666,7
18	Water	5,866	158	1,505	666,7
19	Water	4,181	133,4	15,99	560,7
20	Water	26,78	142,1	15,99	599,5
21	Water	5,829	157,7	0,0337	665,6
22	Water	5,829	157,7	0,0337	665,6
23	Water	5,829	157,7	14,2	2603,9
24	Water	26,47	185,5	15,99	788,2
25	Water	5,671	392,6	14,2	3256

26*	Water	5,405	391,4	14,2	3254
27	Water	3,053	327,1	14,36	3125
28	Water	3,053	327,1	0,3921	3125
29	Water	2,985	271,3	0,5857	3011
30	Water	4,181	106,3	13,87	445,7
31	Water	3,053	327,1	13,97	3125
32	Water	1,348	233,5	13,98	2940,6
33	Water	1,348	233,5	0,745	2940,6
34	Water	1,328	233,5	0,745	2940,6
35	Water	5,778	157,4	14,2	2603,9
36	Water	1,328	107,7	0,745	451,8
37	Water	4,2	74,47	13,87	312
38	Water	1,348	233,5	13,24	2940,6
39	Water	1,328	107,7	0,745	451,8
40	Water	0,4097	117,5	13,24	2717,7
41	Water	0,4097	117,5	0,5304	2717,7
42	Water	0,4035	117,5	0,5304	2717,7
43	Water	0,4097	117,5	12,71	2717,7
44	Water	0,1381	52,26	12,71	2557,6
45	Water	0,1381	52,26	0,6105	2557,6
46	Water	0,1331	51,51	0,6105	2557,6
47	Water	0,4035	76,07	1,275	318,4
48	Water	0,4027	76,02	1,275	318,4
49	Water	4,22	50,83	13,87	213,1
50	Water	0,1381	52,26	12,1	2557,6
51	Water	0,0221	19,06	12,15	2429,8
52	Water	0,0221	19,06	12,15	2429,8

53	Water	1,014	12,62	2536	53,02
54	Water	0,1168	15,33	2536	64,29
55	Water	0,1331	20,13	1,886	84,36
56	Water	0,0221	19,06	1,886	84,36
57	Water	0,0221	19,06	14,03	2114,6
58	Water	0,381	18,53	13,87	77,7
59	Water	4,24	19,65	13,87	82,74
60	Water	4,24	19,64	13,87	82,74
61	Water	1,007	106	0	2688,1
62	Water	1,007	105,9	0	2687,9
63	Water	3,053	159,6	0,1936	2781,3
64	Water	3,053	271,4	0,5857	3011
79	HTF	15	393	111,6	1238,3
80	HTF	15	393	111,6	1238,3
81	HTF	15	393	111,6	1238,3
82	HTF	15	393	77,28	1238,3
83	HTF	15	393	34,28	1238,3
84	HTF	15	393	77,28	1238,3
85	HTF	15	393	34,28	1238,3
86	HTF	14,99	211,3	77,28	806,9
87	HTF	14,96	283	34,28	965,5
88	HTF	14,99	211,3	77,28	806,9
89	HTF	14,96	283	34,28	965,5
90	HTF	14,96	234	111,6	855,6
91	HTF	15,1	236,4	111,6	860,8
92	HTF	15,1	236,4	111,6	860,8

\*El flujo másico de esta corriente es nuestro parámetro de control del ciclo y está fijado.

#### 4.1.4 Funcionamiento al mínimo técnico ( $\approx 20\%$ carga)

Para ajustar nuestros parámetros en este supuesto tan solo tenemos la condición de que de que la turbina trabaje a un 20% de su capacidad como mínimo. Por lo que vamos a tratar de encontrar nosotros las condiciones de radiación mínimas que satisfaga este hecho.

Por coherencia, no obstante, se vigilará que se cumplan las siguientes condiciones del vapor vivo:

- $\dot{m}_{vv} < 15,98$  kg/s
- $p_{vv} < 25,39$  bara
- $T_{vv} < 240,3$  °C
- $P_{bruta} > 11,00$  MWe

El procedimiento de ajuste se realizará de forma parecida. Para poder contar con una referencia en cuanto a flujo másico, se realiza una extrapolación entre los valores obtenidos anteriormente y la potencia obtenida. Por su parte la presión mínima del desaireador se mantendrá igual al caso anterior (la atmosférica), con lo que evitamos una variable. Desconectamos el almacenamiento del campo solar, abrimos los lazos y vamos disminuyendo la irradiación solar (con una precisión de  $1 \text{ W/m}^2$ ) siempre manteniendo una potencia bruta superior a los 11 MW. Finalmente, comprobamos posibles errores en el sistema e iteramos.

Puesto que ahora no tenemos que adaptarnos a un caudal de vapor vivo fijado, tenemos más libertad y por tanto podemos tratar de optimizarlo. En estas condiciones tan extremas resulta difícil el ajuste, ya que nuestro sistema trabaja en condiciones muy distintas de las de diseño. Como en el caso anterior, serán numerosas las veces en las que al intentar realizar cálculos, el software supere el límite de las 300 iteraciones tras el que se detiene y nos muestra un mensaje de error. Repetiremos por tanto los cálculos progresivos para superar el límite de 300 iteraciones.

Las mismas observaciones sobre los errores de no satisfacción del UA de diseño de los intercambiadores y sus posteriores consecuencias se aplican a este caso.

El ajuste óptimo para nuestro modelo trabajando aproximadamente al 20% de la carga se obtiene para los siguientes valores de los parámetros listados a continuación:

- **Stream 26** (Caudal de entrada al cuerpo de baja): 11,75 kg/s
- **Pmín** (Presión mínima de trabajo en el desaireador): 1,014 bar (atmosférica)
- **Id** (Irradiación mínima necesaria para este régimen de trabajo):  $160 \text{ W/m}^2$

Las condiciones conseguidas para nuestro modelo son las siguientes:

- $\dot{m}_{vv} = 13,12$  kg/s
- $p_{vv} = 20,57$  bara
- $T_{vv} = 221,8$  °C
- $P_{bruta} = 11,01$  MWe

La tabla con los parámetros principales de todas las corrientes en este supuesto de carga queda de la siguiente forma:

Tabla 4.4: Corrientes del ciclo de vapor y del ciclo de HTF en torno al 20% de carga

Nº Corriente	Fluido	P [bar]	T [°C]	M [kg/s]	H [kJ/kg]
1	Water	0,3799	17,76	11,67	74,5
2	Water	20,57	221,8	13,12	2823,7
3	Water	9,591	178,1	12,94	2681,1
4	Water	9,591	178,1	0,7994	2681,1
5	Water	9,525	177,8	0,7994	2681,1
6	Water	21,44	177	13,12	750,4
7	Water	21,04	222,8	13,12	2823,7
8	Water	9,591	178,1	12,14	2681,1
9	Water	4,904	151,1	12,1	2581,5
10	Water	4,904	151,1	0,3152	2581,5
11	Water	4,875	150,9	0,3152	2581,5
12	Water	21,54	149,9	13,12	633
13	Water	9,525	177,8	0,7994	753,4
14	Water	4,904	151,1	11,78	2581,5
15	Water	4,904	151,1	11,78	2581,5
16	Water	9,525	177,8	0,7994	753,4
17	Water	4,875	150,9	1,115	636,1
18	Water	4,875	150,9	1,115	636,1
19	Water	3,686	127,3	13,12	534,7
20	Water	21,65	137,4	13,12	579,1
21	Water	4,832	150,6	0,0329	634,6
22	Water	4,832	150,6	0,0329	634,6
23	Water	4,832	150,5	11,75	2587
24	Water	21,44	177	13,12	750,4
25	Water	4,702	392,7	11,75	3257

Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos Mediante Thermoflex

26*	Water	4,482	391,6	11,75	3255
27	Water	2,54	327,6	11,88	3127
28	Water	2,54	327,6	0,2761	3127
29	Water	2,489	257,4	0,4697	2984,5
30	Water	3,686	101,3	11,5	424,9
31	Water	2,54	327,6	11,61	3127
32	Water	1,124	234,3	11,62	2942,8
33	Water	1,124	234,3	0,5925	2942,8
34	Water	1,109	234,2	0,5925	2942,8
35	Water	4,79	150,2	11,75	2587
36	Water	1,109	102,5	0,5925	429,8
37	Water	3,699	70,52	11,5	295,5
38	Water	1,124	234,3	11,02	2942,8
39	Water	1,109	102,5	0,5925	429,8
40	Water	0,3424	118,2	11,02	2719,8
41	Water	0,3424	118,2	0,424	2719,8
42	Water	0,3377	118,2	0,424	2719,8
43	Water	0,3424	118,2	10,6	2719,8
44	Water	0,116	48,74	10,6	2560,4
45	Water	0,116	48,74	0,4654	2560,4
46	Water	0,1126	48,14	0,4654	2560,4
47	Water	0,3377	71,84	1,016	300,7
48	Water	0,3372	71,81	1,016	300,7
49	Water	3,712	47,63	11,5	199,7
50	Water	0,116	48,74	10,14	2560,4
51	Water	0,021	18,3	10,19	2456,4
52	Water	0,021	18,3	10,19	2456,4

53	Water	1,014	12,62	2536	53,02
54	Water	0,1168	14,93	2536	62,59
55	Water	0,1126	19,27	1,482	80,76
56	Water	0,021	18,3	1,482	80,76
57	Water	0,021	18,3	11,67	2154,7
58	Water	0,3799	17,76	11,5	74,5
59	Water	3,726	18,99	11,5	79,93
60	Water	3,726	18,99	11,5	79,93
61	Water	1,007	105,2	0	2686,4
62	Water	1,007	105,2	0	2686,3
63	Water	2,54	157,8	0,1936	2781,3
64	Water	2,54	257,4	0,4697	2984,5
79	HTF	15	393	89,67	1238,2
80	HTF	15	393	89,67	1238,2
81	HTF	15	393	89,67	1238,2
82	HTF	15	393	60,49	1238,2
83	HTF	15	393	29,18	1238,2
84	HTF	15	393	60,49	1238,2
85	HTF	15	393	29,18	1238,2
86	HTF	15	200,3	60,49	783,9
87	HTF	14,97	283	29,18	965,5
88	HTF	15	200,3	60,49	783,9
89	HTF	14,97	283	29,18	965,5
90	HTF	14,97	228,2	89,67	843
91	HTF	15,07	230,6	89,67	848,2
92	HTF	15,07	230,6	89,67	848,2

\*El flujo másico de esta corriente es nuestro parámetro de control del ciclo y está fijado.

## 4.2 Correlaciones

Una vez tenemos las condiciones de trabajo en 5 situaciones diferentes de carga, es hora de obtener correlaciones para las variables involucradas. La tabla resumen con los valores obtenidos queda de la siguiente forma:

Tabla 4.5: Comparativa de los distintos estados de carga

Carga	Parámetros Fijados			Parámetros Calculados			
	Stream 26 [kg/s]	Pmín [bar]	Id [W/m <sup>2</sup> ]	Gross Power [MWe]	Stream 2 [kg/s]	Pvv [bar]	Tvv [°C]
<b>100%</b> <b>Sin</b> <b>almac.</b>	48,43	6,633	461	54,66	58,59	99,78	380,9
<b>75%</b>	37,35	6,633	369	41,35 41,25	44,43 44,44	74,15 75,00	342,4 373,7
<b>50%</b>	25,55	4,761	273	27,56 27,50	29,68 29,67	48,98 50,80	305,3 360,7
<b>25%</b>	14,20	1,014	180	13,98 13,75	15,99 15,98	25,39 27,80	240,3 351,9
<b>≈20%</b>	11,75	1,014	160	11,01 11,00	13,12 N/A	20,57 N/A	221,8 N/A

En letra a color, los valores de referencia enviados por la empresa.

- Stream 26: Caudal de entrada al cuerpo de baja (vapor vivo).
- Pmín: Presión mínima a la que puede trabajar el desaireador.
- Id: Irradiación directa.
- Gross Power: Potencia eléctrica bruta.
- Stream 2: Caudal de entrada al cuerpo de alta.
- Pvv: Presión de vapor vivo.
- Tvv: Temperatura de vapor vivo.



Queremos encontrar por tanto 2 curvas de ajuste. La primera que relaciones el flujo másico entrante al cuerpo de baja (Stream 26) en función del nivel de irradiación solar ( $I_d$ ), y la segunda que relaciones la presión mínima necesaria en el desaireador para garantizar un correcto funcionamiento de este ( $P_{mín}$ ) también en función del nivel de radiación.

Como disponemos de 5 puntos, nuestra curva de ajuste  $\dot{m}_b(I_d)$  será polinómica de grado 4:

Tabla 4.6: Puntos de ajuste  $I_d - \dot{m}_b$

Carga	$I_d$ [ $W/m^2$ ]	$\dot{m}_b$ [kg/s]
100%	461	48.43
75%	369	37.35
50%	273	25.55
25%	180	14.20
~20%	160	11.75

### Ajuste Caudal Cuerpo de Baja

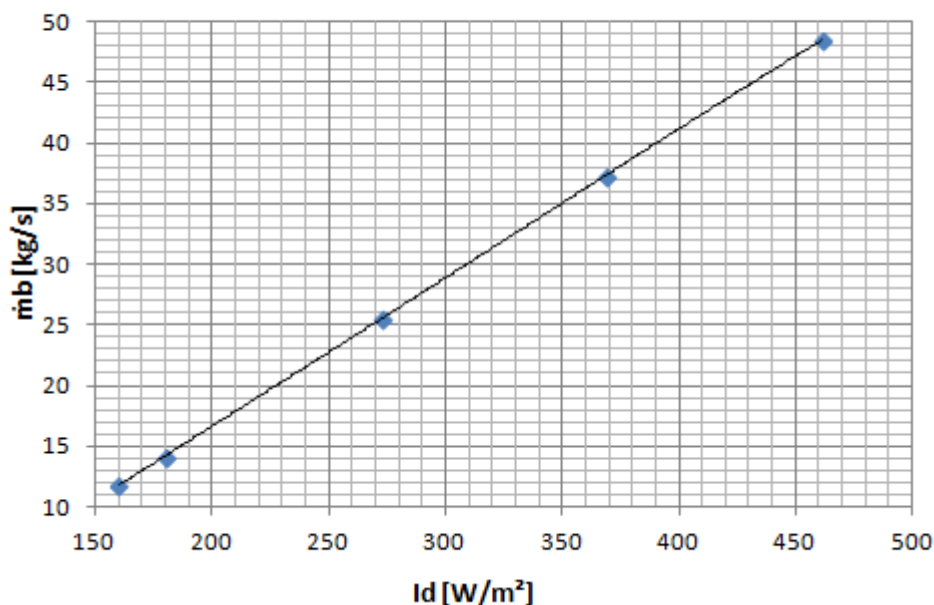


Figura 4.1: Curva de ajuste  $I_d - \dot{m}_b$

La ecuación del ajuste es la siguiente:

$$\dot{m}_b(I_d) = -0.000000000348498445596271 \cdot (I_d)^4 + 0.000000383692797478741 \cdot (I_d)^3 - 0.000150677306030023 \cdot (I_d)^2 + 0.147298138575707 \cdot (I_d) - 9.30357689491234$$

En la cual, aunque no fuese necesario, se han tomado todas las cifras significativas que el programa suministraba.

Para el caso de la presión mínima en el desaireador no dispondremos de 5 puntos. Para situaciones de carga superiores al 75% el mínimo requerido son 6,633 bar, y para valores menores del 25%, la pmín es la atmosférica, con lo que nuestra curva de ajuste se construirá solo a partir de 3 puntos.

Se usará por tanto una curva de ajuste de grado 2:

Tabla 4.7 Puntos de ajuste  $I_d - P_{mín}$

Carga	$I_d$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{mín}$ [bar]
75%	369	6.633
50%	273	4.761
25%	180	1.014

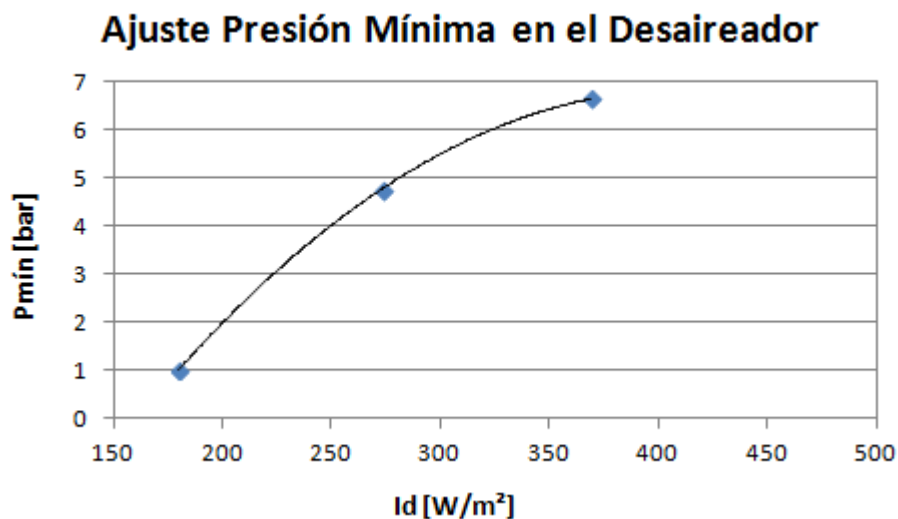


Figura 4.2: Curva de ajuste  $I_d - P_{mín}$

La ecuación del ajuste es:

$$P_{mín}(I_d) = -0.000110001706775899 \cdot (I_d)^2 + 0.0901210957501275 \cdot (I_d) - 11.6437419354838$$

Pese a que lo lógico sería pensar que este segundo ajuste representa una aproximación menos precisa que en el caso del caudal, se notificaron durante la simulación dinámica en Thermoflex diversos errores asociados a este parámetro, para cuyo ajuste inicialmente se había trabajado sin decimales. Tomamos la decisión entonces de, igual que para el caso del ajuste del flujo másico, considerarlos todos.

Una vez obtenidas ambas correlaciones, pasamos a implementarlas en el complemento ELINK para llevar a cabo la simulación dinámica.

## 5 Simulación Horaria (Complemento ELINK)

Como se ha explicado anteriormente, el complemento ELINK es una programación basada en Visual Basic que permite realizar cálculos en un fichero .tfx de forma secuencial.

Trabajaremos con una serie de variables de entrada y salida para analizar el comportamiento de nuestro modelo en las distintas situaciones de trabajo a lo largo de un año.

En nuestro caso, disponemos de datos de irradiación solar relativos a un año tipo. Esta será nuestra primera variable de entrada. Por otro lado, hemos obtenido correlaciones que nos permiten interpolar el flujo másico que debe circular por el ciclo y la presión mínima a la que debe trabajar el desaireador, en función de dicho nivel de radiación (y del nivel de almacenamiento). Serán nuestras 2ª y 3ª variables.

No obstante, debemos tener en cuenta el nivel del almacenamiento. Nuestro sistema funcionará a plena carga siempre que el nivel de radiación o de almacenamiento lo permita. Esto se regulará controlando el nivel del tanque de sales caliente que será nuestra 4ª variable.

Además, necesitaremos controlar el apagado de cada grupo de la turbina en las situaciones en las que no disponiendo de energía suficiente en el almacenamiento, el nivel de radiación cae por debajo de mínimo necesario para mantener la turbina trabajando al menos al 20% de la carga. Por ello necesitaremos 7 variables extra, una por cada grupo de turbina en nuestro modelo. Por su parte, el almacenamiento no suministrará energía en ningún caso si el nivel está por debajo del 11% de capacidad. Esta medida previene que durante un ciclo horario se vacíe por completo. Estará desactivada la carga del mismo si el nivel de radiación no es superior al que garantiza el funcionamiento a plena carga. Se modelará con una variable binaria.

Finalmente, se usará una variable que garantice la operación de todos los lazos de colectores en todo momento.

Además, se incluirán 6 variables de salida. La primera de ellas, el nivel del tanque caliente del almacenamiento al finalizar el periodo, seguida de la potencia eléctrica bruta, la eficiencia del ciclo, la tasa de calor bruta, la potencia entregada a la red y la energía de entrada al almacenamiento.

Para crear el fichero de Excel, seleccionamos la herramienta "*Run from Excel*", la cual nos ofrece la opción de elegir las variables de entrada y salida que aparecerán en el fichero .xlsx, además de permitimos seleccionar el número de casos a simular. Ya que la simulación se realizará mes a mes, deberemos crear 12 ficheros cada uno con tantos casos como número de horas tiene cada mes.

Se mostró una pantalla general de trabajo de este complemento en la *figura 2.3* del apartado 2.3. No obstante, en la *figura 5.1* se puede ver como ejemplo una correspondiente a nuestro propio modelo para el mes de mayo. El **caso base** se trata del caso previamente guardado en el fichero original.

Simulación Dinámica de una Central Termosolar de Captadores Cilindro-Parabólicos Mediante Thermoflex

	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ELINK 25.0 (Save-ONE)		Base Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
2	Copyright (c) 1999-2014, Thermoflow Inc.							
3	Base Case: C:\Users\Carmina\Desktop\Eloy\Curso							
4	2015-2016\FFC\Modelo Central Ingeteam\Modo							
5	2\Modelo Central_mod02.tfx							
6	Computation Message ->		Messages	Messages	Messages	Messages	Messages	Messages
7	<b>INPUT VARIABLE DESCRIPTION</b>	<b>Units</b>	<b>Input</b>	<b>Input</b>	<b>Input</b>	<b>Input</b>	<b>Input</b>	<b>Input</b>
8	Solar Field w/ Storage [66] Aperture normal direct irradiance	W/m^2	461	0	0	0	0	0
9	Fix Flow Stream 26 - Outlet of Pipe [41] -> Inlet of STAssembly[1]: ST Group [3] Mass flow of Stream A	kg/s	48.43	0.	0.	0.	0.	0.
10	Deaerator [13] Minimum DA pressure	bar	6.633	1.014	1.014	1.014	1.014	1.014
11	Solar Field w/ Storage [66] Hot tank level at start of this period	%	10	9	9	9	9	9
12	STAssembly[1]: ST Group [1] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
13	STAssembly[1]: ST Group [2] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
14	STAssembly[1]: ST Group [3] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
15	STAssembly[1]: ST Group [4] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
16	STAssembly[1]: ST Group [5] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
17	STAssembly[1]: ST Group [6] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
18	STAssembly[1]: ST Group [7] Component status (0:working; 2:out-of-service)		0	2	2	2	2	2
19	Solar Field w/ Storage [66] Storage system status: 0=working, 1=out-of-service		0	1	1	1	1	1
20	Solar Field w/ Storage [66] Number of flow paths in operation		216	216	216	216	216	216
21								
22	<b>OUTPUT VARIABLE DESCRIPTION</b>	<b>Units</b>	<b>Output</b>	<b>Output</b>	<b>Output</b>	<b>Output</b>	<b>Output</b>	<b>Output</b>
23	Solar Field w/ Storage [66] Ending hot tank level	%	9.987	9.019	9.019	9.019	9.019	9.019
24	Gross power	kW	54763	0	0	0	0	0
25	Gross electric efficiency(LHV)	%	39.34	0	0	0	0	0
26	Gross heat rate(LHV)	kJ/kWh	9151	0	0	0	0	0
27	Net power	kW	51135	0	0	0	0	0
28	Energy Inflow Solar Field w/ Storage [66] heat transfer	kW	139207	0	0	0	0	0
29								
30								

Figura 5.1: Complemento ELINK (pantalla Excel)

Seguidamente pasamos a explicar con más detalle la implementación de cada una de las 13 variables de entrada.

## 5.1 Definición de variables de entrada

### 1) Irradiación Solar Directa (DNI):

Se han realizado mediciones de radiación en un año tipo hora a hora. Tenemos por tanto 8760 valores de radiación. Cada uno supondrá un caso. El software realizará las 8760 simulaciones en 12 tramos, uno por cada mes, cada uno en un archivo .xlsx distinto (en el apartado 7.3 se explican algunos problemas surgidos durante las simulaciones y las soluciones que se les dieron). Dicho archivo de datos se adjunta con el nombre: *Datos solares.xlsx*.

### 2) Flujo másico de entrada al cuerpo de baja (Stream 26):

Esta variable ( $\dot{m}_b$ ) dependerá por tanto del nivel de radiación ( $I_d$ ) y del nivel del tanque caliente con el que terminó el periodo previo ( $L_{alm}$ ). Su definición se resume en función de las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} \dot{m}_b = 48,43 \frac{kg}{s} & si & I_d \geq 461 \frac{W}{m^2} \cap L_{alm} \geq 11\% \\ \dot{m}_b = \dot{m}_b(I_d) & si & 461 \frac{W}{m^2} > I_d \geq 160 \frac{W}{m^2} \cup L_{alm} < 11\% \\ \dot{m}_b = 0 & si & I_d < 160 \frac{W}{m^2} \cup L_{alm} < 11\% \end{cases}$$

Donde  $\dot{m}_b(I_d)$  es la 1ª correlación obtenida en el apartado 4.2. Dichas condiciones se implementan en excel con la siguiente funcione anidada:

$$=SI(D23 \geq 11; 48.4300003051757; SI(E8 \geq 160; SI(E8 \leq 461; -3.48498445596271E-10*(E8)^4 + 3.83692797478741E-07*(E8)^3 - 0.000150677306030023*(E8)^2 + 0.147298138575707*(E8) - 9.30357689491234; 48.4300003051757); 0))$$

Siendo  $D23$  la celda correspondiente al nivel de almacenamiento al final del periodo anterior, y  $E8$  la del nivel de radiación de la hora en curso.

### 3) Presión mínima de trabajo en el desaireador:

Análogamente, esta variable ( $P_{mín}$ ) dependerá de un modo similar del nivel de radiación y del almacenamiento:

$$\begin{cases} P_{mín} = 6,633 \text{ bar} & si & I_d \geq 369 \frac{W}{m^2} \cup L_{alm} \geq 11\% \\ P_{mín} = P_{mín}(I_d) & si & 369 \frac{W}{m^2} > I_d \geq 180 \frac{W}{m^2} \cap L_{alm} < 11\% \\ P_{mín} = 1,014 \text{ bar} & si & I_d < 180 \frac{W}{m^2} \cap L_{alm} < 11\% \end{cases}$$

La expresión  $P_{\min}(I_d)$  es la 2ª correlación del apartado 4.2. La función anidada en Excel para esta variable es:

$$=SI(D23 \geq 11; 6.63320112228393; SI(E8 < 180; 1.0141794681549; SI(E8 > 369; 6.63320112228393; -0.000110001706775899*(E8)^2 + 0.0901210957501275*(E8) - 11.6437419354838)))$$

Donde  $D23$  y  $E8$  siguen siendo el nivel de almacenamiento al final del periodo anterior y el nivel de radiación del periodo en curso respectivamente.

4) Nivel del almacenamiento al final del periodo previo.

5 - 11) Variables binarias de arranque o parada de los cuerpos de turbina:

Si  $m_b = 0$ , valdrá 2 (out-of-service), en otro caso, valdrán 0 (working).

12) Variable binaria de funcionamiento del sistema de almacenamiento:

El almacenamiento no suministrará energía en ningún caso si el nivel está por debajo del 11% de capacidad. Esta medida previene que durante un ciclo horario se vacíe por completo. Estará desactivada la **carga** del mismo si el nivel de radiación no es superior al que garantiza el funcionamiento a plena carga:

$$=SI(E\$9=0; 1; SI(E\$8 \geq 461; 0; SI(D23 < 11; 1; 0)))$$

Donde  $E\$9$  es  $m_b$ ,  $E\$8$  es  $I_d$  y  $D23$  el nivel de almacenamiento del periodo previo.

13) Número de lazos activos:

Siempre estarán todos activos, por lo que esta variable tendrá un valor cte. igual a 216.

Una vez definidas todas las variables, se procede a iniciar la simulación. Cada uno contiene los datos relativos a un mes y se denominan como: *[3 primeras letras del mes]\_sim\_mod02.xlsx*

En general, el primer caso de cada archivo de cada mes está vinculado al último del mes previo, por lo que, a todos los efectos, la simulación es "continua".

## 5.2 Análisis de las simulaciones

Una vez concluidos los cálculos, queremos realizar un análisis de los resultados. Para ello se crea una hoja nueva en cada archivo Excel (Analysis) cuyo ejemplo para mayo se presenta en la *figura 5.2*

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3		Radiación máxima:			1131 W/m2	
4		Radiación media:			251.0094 W/m2	
5						
6		Almacenamiento máximo:			100 %	
7		Almacenamiento mínimo:			2 %	
8						
9		Horas de luz (Id > 0):			386 h	
10		Horas de funcionamiento:			405 h	
11		Horas con la turbina parada:			339 h	
12						
13		Potencia máxima:			54769 kW	
14		Potencia media:			27061.42 kW	
15		Potencia mín. en operación:			11114.7 kW	
16						
17		Potencia eléctrica máxima:			51142 kW	
18		Potencia eléctrica media:			24795.99 kW	
19		Potencia eléctrica mín. en op.:			8645.193 kW	
20						

Figura 5.2: Ejemplo de variables de análisis en Excel

El análisis realizado se centra en una serie de valores generales, y simplemente pretenden verificar el correcto funcionamiento del programa durante la simulación, amén de obtener algunos macro resultados.

En esta sección, aunque son sencillas, se detallaran las fórmulas implementadas en Excel. Y será en el capítulo 6 donde se presentarán los resultados propiamente.

**Fórmulas para el análisis de resultados:**

- Radiación máxima [W/m<sup>2</sup>];

**=MAX(ELINK!E8:ABT8)**

- Radiación media [W/m<sup>2</sup>];

**=MEDIA.ACOTADA(ELINK!E8:ABT8;0)**

- Almacenamiento máximo [% llenado tanque caliente];

**=MAX(ELINK!E11:ABT11)**

- Almacenamiento mínimo [% llenado tanque caliente];

**=MIN(ELINK!E11:LYD11)**

- Horas de luz (Irradiación solar > 0) [h];

**=CONTAR.SI(ELINK!E8:ABT8; ">0")**

- Horas de funcionamiento de la turbina [h];

**=CONTAR.SI(ELINK!E12:ABT12;0)**

- Horas con la turbina parada [h];

**=744 - CONTAR.SI(ELINK!E12:ABT12;0)**



- Potencia bruta máxima alcanzada [kW];

**=MAX(ELINK!E24:ABT24)**

- Potencia eléctrica media [kW];

**=MEDIA.ACOTADA(ELINK!E24:ABT24;0)**

- Potencia eléctrica mínima con la turbina arrancada [kW] (fórmula matricial);

**{=MIN(SI(SI(ELINK!E24:ABT24>10;ELINK!E24:ABT24)=SI(ELINK!E24:ABT24<56000;ELINK!E24:ABT24)=VERDADERO;ELINK!E24:ABT24))}**

- Potencia máxima entregada a la red [kW];

**=MAX(ELINK!E27:ABT27)**

- Potencia media entregada a la red [kW];

**=MEDIA.ACOTADA(ELINK!E27:ABT27;0)**

- Potencia máxima entregada a la red [kW] (fórmula matricial);

**{=MIN(SI(SI(ELINK!E27:ABT27>10;ELINK!E27:ABT27)=SI(ELINK!E27:ABT27<56000;ELINK!E27:ABT27)=VERDADERO;ELINK!E27:ABT27))}**



## 6 Valoración de Resultados y Conclusiones

Una vez concluidas las simulaciones, y a partir de los datos obtenidos en la hoja de análisis de cada mes, presentamos un balance anual con los resultados:

Tabla 6.1: Macro resultados de la simulación (1)

	Rad. Máx. [W/m <sup>2</sup> ]	Rad. media [W/m <sup>2</sup> ]	Almac. Máx. [%]	Almac. mín. [%]
Enero [744 h]	1,020	202	86.8	2.2
Febrero [674 h]	1,047	210	86.9	2.1
Marzo [744 h]	1,160	304	100.0	2.6
Abril [720 h]	1,061	250	100.0	2.0
Mayo [744 h]	1,131	251	100.0	1.8
Junio [720 h]	1,049	208	100.0	1.7
Julio [744 h]	1,029	225	100.0	4.2
Agosto [744 h]	1,074	254	100.0	2.0
Septiembre [720 h]	1,141	236	100.0	2.9
Octubre [744 h]	1,160	289	100.0	1.8
Noviembre [720 h]	1,160	283	100.0	1.9
Diciembre [744 h]	984	240	80.6	2.0
Global [8760 h]	1,160	246	100.0	1.7

Los datos de radiación máxima y media nos permiten valorar la optimalidad del punto de diseño elegido para el proyecto.

Comprobamos que en 9 meses se alcanza el límite máximo de almacenamiento. Un análisis más detallado permitiría valorar si el número de horas de autonomía (actualmente 9,3 horas) es óptimo.

Por su parte, el nivel mínimo es superior al 1%, con lo que aseguramos el no vaciado del tanque caliente.

Tabla 6.2: Macro resultados de la simulación (2)

	H. luz	H. func.	H. turb. parada
Enero [744 h]	286	351	393
Febrero [674 h]	263	319	353
Marzo [744 h]	349	485	259
Abril [720 h]	372	402	318
Mayo [744 h]	386	405	339
Junio [720 h]	340	332	388
Julio [744 h]	364	374	370
Agosto [744 h]	362	415	329
Septiembre [720 h]	312	364	356
Octubre [744 h]	323	460	284
Noviembre [720 h]	294	462	258
Diciembre [744 h]	304	421	323
Global [8760 h]	3,955	4,790	3,970

De nuevo, en 9 meses se observa que el número de horas de funcionamiento de la turbina supera el número de horas de parada. Por su parte, el sistema de almacenamiento diseñado implica que el número de horas de funcionamiento supere ampliamente al número de horas de luz.

Tabla 6.3: Macro resultados de la simulación (3)

	W máx. [kW]	W media [kW]	W mín. en oper. [kW]
Enero [744 h]	54,769	23,644	12,134
Febrero [674 h]	54,769	24,008	11,261
Marzo [744 h]	54,769	33,414	13,568
Abril [720 h]	54,769	27,393	11,988
Mayo [744 h]	54,769	27,061	11,115
Junio [720 h]	54,769	22,734	11,550
Julio [744 h]	54,769	25,466	14,291
Agosto [744 h]	54,769	27,747	12,862
Septiembre [720 h]	54,769	25,858	12,134
Octubre [744 h]	54,769	31,815	13,568
Noviembre [720 h]	54,769	33,146	11,988
Diciembre [744 h]	54,769	28,872	12,555
Global [8760 h]	54,769	27,597	11,115

En términos de potencia bruta, tienen especial relevancia los valores de potencia media. Se comprueba a su vez que nuestro modelo funciona correctamente en cuanto a que la turbina siempre trabaja por encima del 20% de la carga, límite establecido por el fabricante.

Tabla 6.4: Macro resultados de la simulación (4)

	W a red máx. [kW]	W a red media [kW]	W a red mín. en oper. [kW]	Energía a red total producida [GWh]
Enero [744 h]	51,139	21,671	9,643	16.123
Febrero [674 h]	51,139	21,961	8,788	14.758
Marzo [744 h]	51,142	30,544	11,047	22.725
Abril [720 h]	51,142	25,161	9,500	18.116
Mayo [744 h]	51,142	24,796	8,645	18.448
Junio [720 h]	51,142	20,895	9,071	15.044
Julio [744 h]	51,142	23,399	11,755	17.409
Agosto [744 h]	51,142	25,428	10,355	18.918
Septiembre [720 h]	51,142	23,672	9,643	17.044
Octubre [744 h]	51,142	29,125	11,047	21.669
Noviembre [720 h]	51,142	30,317	9,500	21.829
Diciembre [744 h]	51,140	26,501	10,055	19.716
Global [8760 h]	51,142	25,289	8,645	221.800

Se visualizan aquí los datos de potencia entregada a red. El mínimo valor entregado con la planta en funcionamiento supera los 8,5 MW. Se observan también los datos de producción neta por mes, y la total a lo largo del año (221,8 GWh). Resultados que previa comparación con otras centrales similares, certifican la viabilidad técnica del proyecto.

## **Anexo A: Movimiento solar en Matlab (simulación)**

---

Inicialmente, estaba previsto incluir en los cálculos los efectos debidos a la variación en la dispersión, absorción y eficiencia reflectiva de las superficies de los canales parabólicos en función de los ángulos solares. Si bien, el software consumía una gran cantidad de recursos para ello, multiplicando por 5 el tiempo de cálculo de cada hora, siendo necesarias además un mayor número de iteraciones en el proceso. Este hecho motivaba que durante el proceso de simulación hora a hora se superara en ocasiones el límite de 300 iteraciones para cada entrada. Lo que significaba que la simulación se detenía, o bien continuaba ignorando el caso en cuestión. Como cada entrada horaria estaba basada en el nivel de almacenamiento con el que concluía la anterior, esto representaba un problema a resolver.

Con intención de agilizar estos cálculos, se optó en primer lugar por valorar de forma cualitativa la importancia de considerar estos efectos, por lo que entre otras opciones, se programó en Matlab una simulación gráfica del movimiento solar. La cual se incluye en este anexo.

Finalmente, teniendo en cuenta el seguimiento solar en un eje de los canales parabólicos, y la asumiblemente pequeña pérdida de precisión que se cometía al no considerar tales efectos, se optó por no incluirlos en los cálculos.

No obstante, a modo de referencia, se adjuntan los archivos correspondientes a los datos de posición solar para cada hora del año en formato .xlsx.

El programa realizado en Matlab comienza por leer el archivo *zenit\_azimut.xls* y por tratar los datos para poder realizar la presentación gráfica dinámica. Acto seguido, crea una superficie semiesférica que representa la cúpula celeste. A continuación, una partícula describe el movimiento solar tomando un día central de cada mes y dejando una estela allá por donde pasa.

**Inicio Código**

```

close all
clear all
clc
A=xlsread('zenit_azimut');

zenit=A(:,1)*pi/180;
azimut=A(:,2)*pi/180+pi/2;

%%Superficie
aux1=zenit~=pi/2;
zenitS=zenit(aux1);
azimutS=azimut(aux1);
X=sin(zenitS).*cos(azimutS);
Y=-sin(zenitS).*sin(azimutS);
Z=cos(zenitS);

F = TriScatteredInterp(X,Y,Z, 'natural'); %Interpolador (los datos X,Y
no forman una malla)

x=linspace(min(X),max(X),300);
y=linspace(min(Y),max(Y),300);
[XX3,YY3]=meshgrid(x,y); %Malla X,Y
ZZ3=F(XX3,YY3); %Valor de Z por interpolacion

% surf(XX3,YY3,ZZ3)
% shading interp %flat
% colormap(hot)
% caxis([0,0]);

hold on

[X,Y,Z] = sphere(50);
shading interp;
[ Aa Bb ] = find(X>=0 & Y<=0 & Z>=0);
colormap(gray);
surfl(X(Aa,Bb),Y(Aa,Bb),Z(Aa,Bb));
shading flat;
axis equal;

%%Trayectorias diarias
xlabel('Sur'),ylabel('Este'), zlabel('z')
axis([-1 1 -1.5 1 0 1.1])
view(55,25) %Angulo de vision
orange=[0.8,0.5,0.]; %(Definir un color cualquiera para los plot)
mes=['Enero ','Febrero ','Marzo ','Abril ','Mayo
','Junio ','...
','Julio ','Agosto ','Septiembre','Octubre ','Noviembre
','Diciembre '];

tic
for i=15:30:365

    zenitaux=zenit(24*(i-1)+1:24*(i-1)+24);
    azimutaux=azimut(24*(i-1)+1:24*(i-1)+24);

```



```
aux=(zenitaux~=pi/2);
azimutaux=azimutaux(aux);
zenitaux=zenitaux(aux);

X=sin(zenitaux).*cos(azimutaux);
Y=-sin(zenitaux).*sin(azimutaux);
Z=cos(zenitaux);
n=length(X);
nv=1:n;
nvv=1:0.2:n;          %Interpolacion datos diarios (movimiento
continuo)
XX=interp1(nv,X,nvv);
YY=interp1(nv,Y,nvv);
ZZ=interp1(nv,Z,nvv);
nvp=length(XX);

for j=2:nvp
    title(mes(ceil(i/30),:))

h1=plot3(XX(1:j),YY(1:j),ZZ(1:j),'color',orange,'LineWidth',1.5);
    %h1=plot3(XX(j-1:j),YY(j-1:j),ZZ(j-
1:j),'color',grey,'LineWidth',1.5);
    h2=plot3(XX(j),YY(j),ZZ(j),'or','LineWidth',2);
    pause(0.01)
    delete(h2)          %Borrar para que el punto rojo no deje
estela
    %delete(h1)        %Borra estela diaria
end
    %pause(0.01)

%     %Estela fugaz
%     for j=10:nvp
%         h1=plot3(XX(j-9:j),YY(j-9:j),ZZ(j-
9:j),'color',grey,'LineWidth',1.5);
%         h2=plot3(XX(j),YY(j),ZZ(j),'or','LineWidth',2);
%         pause(0.02)
%         delete(h2)    %Borrar para que el punto rojo no deje
estela
%         delete(h1)
%     end

end
toc
```

**Fin Código**



# Anexo B: Justificaciones en torno a la toma de decisiones

---

## **1) Diferente diseño del campo solar relativo al múltiplo solar y número de lazos:**

Como se explicó con anterioridad, el objetivo del modelo era el de obtener datos orientativos ante la ingeniería básica del proyecto. El software Thermoflex 25 es una herramienta compleja de gran potencia que requiere un alto grado de conocimientos para poder aprovechar al máximo todos sus recursos. La realización de este proyecto incluía el aprendizaje en el uso de la herramienta, por lo que desde el inicio se realizaron algunas pequeñas modificaciones con el fin de poder progresar a buen ritmo tanto en el aprendizaje, como en la consecución del objetivo final, que era la simulación anual. El diseño del campo solar recibió algunas de estas simplificaciones, que, no obstante, no han llegado a suponer una pérdida importante de precisión.

## **2) Temperatura de vapor vivo menor que la de los datos provistos por la empresa encargada del proyecto a carga parcial:**

Debido a los pocos datos suministrados por la empresa, el ajuste del modelo a carga parcial se complica. Se planteó la inclusión de nuevas variables de control del modelo, pero se desechó la idea por suponer una gran complejidad de trabajo a cambio de una muy pequeña mejora en términos de precisión. Con el consenso de mi tutor, el profesor Javier Pino, se decidió validar el funcionamiento de los modelos pese a esta variación en la temperatura.

De cualquier forma, considerando el mismo en modo "caja negra", la relación entre los valores de Radiación Normal Directa y potencia bruta producida son prácticamente idénticos.

## **3) No inclusión de ángulos solares:**

Desde el inicio, la inclusión de ángulos solares supuso un problema. El cálculo llevado a cabo por el programa en relación a los ángulos solares se realiza de un modo similar al de elementos finitos. El software malla la superficie de los captadores y aplica el algoritmo correspondiente trozo a trozo. Por defecto, cada uno de los lazos está dividido en 10, con lo que aproximadamente el tiempo de cálculo para cada caso de la simulación se multiplicaba por 5.

Por su parte, el mayor número de iteraciones que debía realizar el programa conllevaba que en la mayoría de ocasiones se sobrepasase el límite máximo de 300 iteraciones por cada caso. Esto significaba, como se ha explicado con anterioridad, que el cálculo se detenía y dicho tramo horario quedaba sin resultado. Al estar acoplados los casos siguientes, el resultado a partir de ese tramo se volvía inconsistente. Por este motivo, y siempre con la aprobación de mi tutor, se decidió no incluir el efecto de los ángulos solares.

**4) Simulación realizada en 12 archivos distintos (mensuales):**

Inicialmente, la simulación final estaba pensada para ser realizada en un solo archivo .xlsx. Si bien, el software presentaba algunos problemas en la manipulación de un archivo de tal tamaño. Se intentó realizar tal simulación en distintos ordenadores para asegurarnos de que el problema no residía en las capacidades de los mismos. No obstante, en todos aparecieron los mismos problemas.

Una vez fragmentado el archivo original en 12 tramos mensuales, la simulación se llevó a cabo con mayor facilidad. Hacemos notar en todo caso, que aun así se encontraron ciertas irregularidades. Sin embargo, las mismas fueron más fácilmente localizables y reparables gracias al reducido tamaño de los ficheros.

## Referencias

---

- Manual electrónico software Thermoflex (suministrado con el programa)
- Tutoriales software Thermoflex: [https://www.thermoflow.com/tf\\_videos.html](https://www.thermoflow.com/tf_videos.html)
- Manual MATLAB r2006 [http://www.sisoft.ucm.es/Manuales/MATLAB\\_r2006b.pdf](http://www.sisoft.ucm.es/Manuales/MATLAB_r2006b.pdf)

### **- Otros documentos consultados:**

- **Artículo:** Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments.

Applied Energy, Volume 160, 15 December 2015, Pages 286-307

Ben Xu, Peiwen Li, Cholik Chan

- **Documento:** Recent developments on application of phase change materials for thermal storage.

-----

- **Artículo:** Investigation of solar parabolic trough power plants with and without integrated TES (thermal energy storage) and FBS (fuel backup system) using thermic oil and solar.

Energy, Volume 88, August 2015, Pages 292-303

T.E. Boukelia, M.S. Mecibah, B.N. Kumar, K.S. Reddy

- **Documento:** Configurations for solar parabolic trough power plants (with and without Thermal Energy Storage).

- **Artículo:** Parametric Study of Two-tank TES Systems for CSP Plants

Energy Procedia, Volume 69, May 2015, Pages 1049-1058

S. Torras, C.D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez, J. Rigola, A. Oliva

- **Documento:** Parametric study 2 tanks TES CSP.

## Glosario

---

Bara: Bar absolutos (presión absoluta)

CSP: Concentrated Solar Power

HP: High Pressure

HTF: Heat Transfer Fluid

LFR: Linear Fresnel Reflector

LP: Low Pressure

MWe: Megavatios en forma de energía eléctrica

MWt: Megavatios en forma de energía térmica

PDS: Parabolic Dish System

PMC: Phase Change Material

PTC: Parabolic Through Collector

SCA: Solar Collector Assemblies

SCE: Solar Collector Elements

SPT: Solar Power Tower

SPTC: Solar Parabolic Trough Collector

TES: Thermal Energy Storage





